

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

João Paulo Ribeiro da Silva

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM OPERAÇÃO DO SISTEMA DE  
CONTROLE DE SERVOVÁLVULAS QUE INTEGRAM UMA  
BANCADA DE ENSAIOS DE SISTEMAS DE FREIOS AUTOMOTIVOS**

Santa Maria, RS  
2022

**João Paulo Ribeiro da Silva**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM OPERAÇÃO DO SISTEMA DE  
CONTROLE DE SERVOVÁLVULAS QUE INTEGRAM UMA  
BANCADA DE ENSAIOS DE SISTEMAS DE FREIOS AUTOMOTIVOS**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Cristiano José Scheuer, Dr. Eng.

Santa Maria, RS  
2022

**João Paulo Ribeiro da Silva**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM OPERAÇÃO DO SISTEMA DE  
CONTROLE DE SERVOVÁLVULAS QUE INTEGRAM UMA  
BANCADA DE ENSAIOS DE SISTEMAS DE FREIOS AUTOMOTIVOS**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

**Aprovado em 22 de setembro de 2022:**

---

**Prof. Cristiano José Scheuer, Dr. Eng. (DEM/UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng. (DEM/UFSM)**

---

**Rafael Pains Pavlak, Ms. Eng. (FRAS-LE SA)**

Santa Maria, RS  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Airton Ribeiro e Maria Helena Mallmann, que durante todo o ciclo foram importantíssimos e deram total apoio para que esse momento chegasse. Com toda certeza vocês são as pessoas mais importantes da minha vida.

Aos meus irmãos Airton Jr e Luiz Eduardo que estiveram ao meu lado durante todos os momentos, me apoiando e incentivando durante todo tempo. De coração, obrigado!

A minha companheira Luiza Rodrigues que durante todo o ciclo de aprendizado esteve ao meu lado, me incentivando e me colocando no caminho certo.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da UFSM, pelos aprendizados proporcionados e pelas conversas incentivadoras durante os anos da graduação. Saibam que vocês todos são inspirações para nós alunos. Um agradecimento especial aos professores Thompson Diórdinis Metzka Lanzasova, pela orientação durante todos esses anos no projeto Bombaja, e ao Cristiano José Scheuer pela orientação e conversas durante a execução deste trabalho.

A empresa FRAS-LE S.A por proporcionar toda infraestrutura necessária à realização deste trabalho. Por fim um agradecimento especial aos profissionais: Eng. Luiz Rafael Coelho, Gustavo Tonet, Marcos Roberto Farias, Daniela Lemos, Camila Bonato e Joana Pasquali; que foram imprescindíveis para a execução de cada passo deste trabalho.

Obrigado!

## RESUMO

AUTOR: João Paulo Ribeiro da Silva  
ORIENTADOR: Cristiano José Scheuer

### ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM OPERAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE SERVOVÁLVULAS QUE INTEGRAM UMA BANCADA DE ENSAIOS DE SISTEMAS DE FREIOS AUTOMOTIVOS

O setor da indústria automotiva tem evoluído constantemente ao longo dos anos, de modo a adequar-se às demandas que regem o mercado atual e as normativas cada vez mais rígidas dos seus órgãos regulamentadores. Nesse contexto, afim de atender aos requisitos de clientes, a indústria de materiais de atrito emprega ensaios de laboratório e de campo, com o intuito de desenvolver e certificar novos produtos, e realizar o controle de qualidade de peças produzidas. Neste sentido, FRAS-LE S.A utiliza-se de dinamômetros inerciais de freio de veículos leves e pesados do laboratório de pesquisa com servoválvulas de comando e controladores PID para ajustar a pressão, torque e desaceleração do sistema de freio durante a realização de tais ensaios. Dessa forma, as servoválvulas são fundamentais na manutenção das condições de ensaios especificadas pelas normas que os regem, influenciando diretamente sobre a confiabilidade dos resultados e conferindo credibilidade aos dados obtidos. No intuito de contribuir com o processo e com a otimização de resultados do laboratório, este trabalho tem como objetivo propor mecanismos de prevenção de erros, além do desenvolvimento de métodos que facilitem o ajuste dos parâmetros de controle PID dos dinamômetros inerciais. A partir de um diagrama Ishikawa que norteia o trabalho com hipóteses, realizaram-se estudos comparativos dos pontos indicados, como forma de avaliar o comportamento e estudar as formas de mudança de processo a partir dos resultados. Ademais, realizou-se análises comparativas de heterogeneidade de dureza das amostras, desalinhamento entre o conjunto disco e pastilha, bem como a proposição de modelos matemáticos para quantificação de erro nos dois regimes principais de controle. Igualmente, no decorrer do estudo também foram investigados casos de problemas no controle PID, recorrente no cotidiano do laboratório, avaliando e indicando meios de prevenção que visassem a otimização dos resultados. Os resultados obtidos evidenciam o quanto a heterogeneidade das amostras e o alinhamento do par tribológico mudam a variância dos resultados aferidos, prejudicando diretamente o regime permanente do ciclo de frenagem, e podendo levar a resultados fora do padrão normativo. A partir do estudo de caso também foi possível confirmar que a troca de sistema de freio e as falhas em componentes mecânicos são os principais causadores dos chamados de manutenção relacionados ao controle PID no laboratório. Dessa forma, entende-se que a pesquisa coopera de maneira importante para a empresa, tendo em vista que as conclusões obtidas resultaram em um banco de dados de controle PID, fazendo com que para cada ensaio e cada conjunto de freios já existam parâmetros pré-setados de controle, minimizando a recorrência de paradas de máquina para ajuste.

**Palavras-chave:** Controle, PID, dinamômetros inerciais, sistema de freios.

## **ABSTRACT**

AUTHOR: João Paulo Ribeiro da Silva  
ADVISOR: Cristiano José Scheuer

### **ANALYSIS OF BEHAVIOR IN OPERATION OF THE SERVOVALVE CONTROL SYSTEM INTEGRANT OF A TEST BENCH FOR AUTOMOTIVE BRAKE SYSTEMS**

Over the last years, the automotive industry sectors have been in constant development in order to adapt to the demands that govern the market and to comply with the increasingly rigorous normative standards of regulatory bodies. To meet customer requirements, in addition to the quality control of all parts, the friction material manufacturers employ both bench and field tests aiming to develop and certify new products. In the research laboratory of FRAS-LE S.A, the inertial brake dynamometers for light and heavy vehicles use servo valves with PID controllers that modulate pressure, torque, and deceleration of the braking system during tests. Thus, the servo valves have an essential role in maintaining the test conditions specified by the standards, directly affecting the reliability of the results, and as a consequence, the credibility of the data obtained. Aiming to improve the process of the lab tests, the current research attempts to propose safety measures to prevent failures and ease the adjustment of the PID control parameters of the dynamometers. Using an Ishikawa diagram as a model, a comparative study was made with the provided numbers to evaluate the performance and then, consider modifications in the process. A series of comparative analysis were performed: the heterogeneity of the hardness of samples, the disc brake misalignment, mathematical models to measure the error quantification rate in the two main control regimes. Moreover, during the study, cases of problems in the PID controller, recurring in the lab daily routine, were identified. Thereby, the study could evaluate and indicate procedures to prevent it. The results show to what extent the heterogeneity of the samples and the alignment of the tribological pair affect the variance of measured results, directly spoiling the permanent regime of the braking cycle, and even resulting in numbers that do not meet normative standards. Based on the case study, it is possible to confirm that the replacement of the braking system and the failures in mechanical components are the two main causes of product recalls related to PID controllers in the laboratory. Therefore, the outcome of this research is the creation of a database of PID control, that provides, for every future test, established control parameters for each brake, minimizing machine downtime for adjustments.

**Keywords:** Control, PID, Dynamometer, Brakes System

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Esquema de um sistema de freios hidráulico. ....  | 15 |
| Figura 2 – Esquema de um sistema de freios com acionamento hidráulico.....   | 16 |
| Figura 3 – Esquema de um sistema de freios com acionamento pneumático. ....  | 17 |
| Figura 4 – Diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de freios a disco<br>automotivo. ....   | 18 |
| Figura 5 – Ilustração de um freio a tambor evidenciando seus elementos constituintes.....  | 18 |
| Figura 6 – Ilustração mostrando lonas de freio e pastilhas de freio (a esquerda e a direita da<br>imagem, respetivamente).....                             | 19 |
| Figura 7 – Fotografia da seção transversal de uma pastilha de freio, evidenciando seus<br>elementos constituintes.....                                     | 19 |
| Figura 8 – Esquema indicando a variação da pressão no disco em função do ângulo diferencial<br>do arco da lona.....  | 22 |
| Figura 9 – Esquema ilustrativo de um dinamômetro inercial.....   | 23 |
| Figura 10 – Ilustração de uma servoválvula.....  | 23 |
| Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de controle PID.....   | 25 |
| Figura 12 – Diagrama Ishikawa.....   | 28 |
| Figura 13 – Dinamômetro inercial tipo A.....   | 29 |
| Figura 14 – Layout de visualização do <i>software</i> RevData PLUS utilizado no controle do<br>dinamômetro inercial tipo A.....                            | 31 |
| Figura 15 – Tela utilizada para efetuar a mudança de parâmetros de ensaio durante a sua<br>realização.....   | 32 |
| Figura 16 – Configurações possíveis para o controle dos dinamômetros via sistema PID.....  | 32 |
| Figura 17 – Malha fechada controle PID dinamômetro.....  | 33 |
| Figura 18 – Diagrama da evolução do torque e pressão durante um ensaio dinanométrico. ...  | 34 |
| Figura 19 – Indicação dos regimes transitório e permanentes no diagrama da Figura 18.....  | 35 |
| Figura 20 – Variação aceitável nos valores de leitura da servoválvula.....   | 36 |
| Figura 21 – Comparativo entre as leituras efetuadas durante os ensaios antes e após a<br>quantificação dos percentis de erros de leitura.....              | 38 |
| Figura 22 – Fluxograma detalhando as caracterizações realizadas para comparação dos<br>materiais de atrito.....  | 39 |
| Figura 23 – Durômetro empregado nas medidas de dureza.....   | 40 |
| Figura 24 – Esquema indicando a posição de leitura da dureza nas pastilhas de freio do grupo<br>1.....   | 41 |
| Figura 25 – Esquema indicando a posição de leitura da dureza nas pastilhas de freio do grupo<br>2.....   | 41 |
| Figura 26 – Indicação da confecção e corpos de prova para os ensaios de atrito a partir das<br>pastilhas de freio.....                                     | 42 |
| Figura 27 – Ilustração indicando o desalinhamento na montagem do disco de freio, medido em<br>relação a pastilha.....                                      | 45 |
| Figura 28 – Fotografia mostrando o <i>setup</i> experimental empregado na determinação do<br>desalinhamento do disco em relação às pastilhas de freio..... | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 29 – Procedimento empregado para controlar a variação nos valores das variáveis de controle dos ensaios..... | 48 |
| Figura 30 – Indicação da metodologia adotada para controle do tempo de processamento dos dados de frenagem. ....    | 49 |
| Figura 31 – Indicação da metodologia adotada para controle das variáveis de ensaio. ....                            | 50 |
| Figura 32 – Desvio padrão das leituras de dureza realizados entre os lados A e B da amostra 12. ....                | 57 |
| Figura 33 – Indicação das inspeções visuais realizadas após ensaio de dureza. ....                                  | 58 |
| Figura 34 – Heterogeneidade dos valores de dureza das amostras <i>versus</i> comportamento PID. ....                | 60 |
| Figura 35 – Comportamento de erro conforme heterogeneidades nos valores de dureza das amostras. ....                | 61 |
| Figura 36 – Comportamento dos erros em regime permanente e transitório medidos nos ensaios 1 e 2.....               | 63 |
| Figura 37 – Comportamento isolado dos erros em regime permanente nos ensaios 1 e 2.....                             | 63 |
| Figura 38 – Comparativo de comportamento do controle PID entre stop em ensaio 1 e 2, sem desalinhamento. ....       | 64 |
| Figura 39 – Comportamento isolado dos erros em regime transitório nos ensaios 1 e 2. ....                           | 65 |
| Figura 40 – Comparativo de comportamento do controle PID entre stop em ensaio 1 e 2, com desalinhamento. ....       | 65 |
| Figura 41 – Comportamento do controle PID pré-ajuste de parâmetros da servoválvula.....                             | 66 |
| Figura 42 – Comportamento do controle PID após realizar o ajuste de parâmetros da servoválvula.....                 | 67 |
| Figura 43 – Comportamento de aplicação do controle PID conforme evolução da pressão....                             | 68 |
| Figura 44 – Aplicação do freio <i>versus</i> pressão.....   | 68 |
| Figura 45 – Comportamento do controle PID do dinamômetro B após troca do cilindro mestre. ....                      | 69 |
| Figura 46 – Variação do controle PID nos ensaios com o dinamômetro “tipo Z”.....                                    | 72 |
| Figura 47 – Fluxo de salvamento de arquivos SVO.....  | 73 |
| Figura 48 – Diagrama Ishikawa com os apontamentos validados no presente trabalho de conclusão de curso. ....        | 76 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Componentes dos sistemas PID.....  | 25 |
| Tabela 2 – Tópicos prioritários deste estudo, segundo o diagrama Ishikawa. ....                           | 28 |
| Tabela 3 – Características do dinamômetro. ....   | 30 |
| Tabela 4 – Significado de cada ponto indicado no diagrama da Figura 18.....                               | 35 |
| Tabela 5 – Tabela de aferição dos resultados FRAS-LE.....   | 41 |
| Tabela 6 – Planejamento adotado na execução dos ensaios de atrito.....                                    | 43 |
| Tabela 7 – Variáveis de referência para o controle do dinamômetro inercial. ....                          | 48 |
| Tabela 8 – Indicação da fórmula empregada para controle das leitura pelo Software Revdata+®.<br>.....     | 49 |
| Tabela 9 – Indicação da fórmula empregada para medida do erro de leitura pelo Software<br>Revdata+®. .... | 50 |
| Tabela 10 – Planilha indicando os dados de saída dos ensaios. ....  | 51 |
| Tabela 11 – Funções e variáveis para programação do modelo. ....  | 53 |
| Tabela 12 – Caminho e cabeçalho do modelo matemático. ....  | 53 |
| Tabela 13 – Tabela com segundo campo de preenchimento do modelo. ....                                     | 54 |
| Tabela 14 – Tabela de visualização de resultados de erros. ....   | 54 |
| Tabela 15 – Resultados das medidas de durezas por amostra do Grupo 1.....                                 | 55 |
| Tabela 16 – Resultados das medidas de durezas por amostra do Grupo 2.....                                 | 56 |
| Tabela 17 – Roteiro para escolha das amostras para ensaios em dinamômetro.....                            | 57 |
| Tabela 18 – Comparativo PID entre os ensaios 1 a 4.....   | 59 |
| Tabela 19 – Comparativo PID entre os ensaios 5 a 8.....   | 59 |
| Tabela 20 – Comparativo PID entre os ensaios 9, 10 e 11.....  | 60 |
| Tabela 21 – Comparativo dureza Gogan versus erros de controle.....  | 61 |
| Tabela 22 – Erros de PID lidos nos ensaios 1 e 2.....   | 62 |
| Tabela 23 – Ajuste de parâmetros para manutenção da servoválvula. ....                                    | 67 |
| Tabela 24 – Mapeamento dos erros de controle para ensaio do dinamômetro "tipo Z".....                     | 70 |
| Tabela 25 – Resultados das leituras realizadas sobre as pastilhas do Grupo 1. ....                        | 80 |
| Tabela 26 – Resultados das leituras realizadas sobre as pastilhas do Grupo 2, no lado A.....              | 81 |
| Tabela 27 – Resultados das leituras realizadas sobre as pastilhas do Grupo 2, no lado B.....              | 82 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|      |  |
|------|--|
| LVDT | Transformadores lineares variáveis diferenciais.               |
| NVH  | Testes de ruído, vibração e fricção para em sistemas de freios |
| P&D  | Pesquisa e Desenvolvimento                                     |
| PID  | Controlador proporcional integral derivativo                   |
| TCC  | Trabalho de conclusão de curso                                 |

## SUMÁRIO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 11 |
| 1.1      | APRESENTAÇÃO .....   | 11 |
| 1.2      | OBJETIVOS.....   | 13 |
| 1.2.1    | Objetivo geral .....   | 13 |
| 1.2.2    | Objetivos específicos.....   | 13 |
| 1.3      | JUSTIFICATIVA.....   | 13 |
| 1.4      | ESTRUTURA DO TCC.....  | 14 |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                 | 15 |
| 2.1      | SISTEMA DE FREIOS.....   | 15 |
| 2.1.1    | Sistema hidráulico de acionamento .....                            | 16 |
| 2.1.2    | Sistema mecânico de acionamento.....                               | 16 |
| 2.1.3    | Sistema pneumático de acionamento .....                            | 17 |
| 2.1.4    | Sistema de freio a disco.....                                      | 17 |
| 2.1.5    | Sistema de freio a tambor.....                                     | 18 |
| 2.2      | PASTILHAS E LONAS DE FREIO.....                                    | 19 |
| 2.2.1    | Materiais de atrito.....   | 20 |
| 2.3      | DINAMICA DE FRENAGEM .....   | 21 |
| 2.3.1    | Pressão de frenagem.....   | 21 |
| 2.3.2    | Torque de frenagem.....  | 22 |
| 2.4      | ENSAIOS EM LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE FREIO .....                  | 22 |
| 2.4.1    | Ensaio de atrito em dinamômetro .....                              | 22 |
| 2.4.1.1  | Servoválvula .....   | 23 |
| 2.4.1.2  | Controle PID .....   | 24 |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                   | 27 |
| 3.1      | DIAGRAMA ISHIKAWA.....   | 27 |
| 3.2      | ENSAIO DE DINAMÔMETRO.....   | 29 |
| 3.2.1    | Software de análise de dados e configurações de controle .....     | 30 |
| 3.2.2    | Controle PID no processo de frenagem.....                          | 32 |
| 3.2.2.1  | Regimes de controle.....   | 34 |
| 3.2.2.2  | Problemas recorrentes .....  | 36 |
| 3.3      | QUANTIFICAÇÃO DE PERCENTIL DE ERRO NOS REGIMES DO SISTEMA.....     | 37 |
| 3.4      | COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS DE ATRITO.....                      | 39 |
| 3.4.1    | Medições de dureza .....   | 40 |
| 3.4.2    | Medições de atrito .....   | 42 |
| 3.4.3    | Comparativo de controle PID.....                                   | 44 |
| 3.5      | COMPARATIVO DE POSICIONAMENTO DO DISCO DE FREIO .....              | 44 |
| 3.6      | ESTUDOS DE CASO .....  | 46 |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                | 47 |
| 4.1      | MODELO MÁTEMÁTICO DE PERCENTIL DE ERRO NOS REGIMES DO SISTEMA..... | 47 |
| 4.1.1    | Modelo matemático para análise durante ensaio.....                 | 47 |
| 4.1.2    | Modelo matemático para análise pós ensaio .....                    | 52 |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2      | COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS DE ATRITO.....                        | 55        |
| 4.2.1    | Medições de dureza.....  | 55        |
| 4.2.2    | Medições de atrito e comparativo PID.....                            | 58        |
| 4.3      | COMPARATIVO ENTRE DESALINHAMENTO DO DISCO.....                       | 62        |
| 4.4      | ESTUDO DE CASO.....  | 66        |
| 4.4.1    | Análise e correção de falha em leituras.....                         | 66        |
| 4.4.2    | Tipos de Freios e comportamento PID.....                             | 69        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                     | <b>75</b> |
| 5.1      | CONCLUSÕES.....  | 75        |
| 5.2      | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....                                  | 77        |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>78</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – RESULTADOS DAS MEDIDAS DE DUREZA NA ESCALA GOGAN</b> |           |
|          | 80   |           |
| A.1      | PASTILHAS DE FREIO DO GRUPO 1.....                                   | 80        |
| A.2      | PASTILHAS DE FREIO DO GRUPO 2.....                                   | 81        |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

Com o contínuo e exponencial crescimento da demanda pelos seus produtos, a indústria automobilística vem oferecendo ao mercado novas tecnologias, de modo à atender aos requisitos de consumidores cada vez mais exigentes. Neste sentido, ao longo dos últimos anos, foram introduzidos no mercado veículos mais eficientes, mais leves, com *design* mais aerodinâmico, etc., sempre visando diminuir o seu consumo e aumentar a sua performance.

Além do investimento em pesquisas visando tais requisitos, a indústria automobilística também investe substancialmente nos requisitos de segurança. Neste contexto, o sistema de freios constitui um item importante para garantir a segurança do condutor e passageiros. Este sistema pode ser dividido em três partes: i) o rotor, que é a primeira parte do ‘casal de atrito’, o qual gira juntamente com a roda; ii) a lona de freio, componente estacionário do ‘casal de atrito’, que quando acionada pelo pistão entra em contato com o rotor, transformando a energia cinética do movimento das rodas em energia térmica dissipada pelo rotor; e, por fim, iii) o sistema hidráulico ou pneumático de acionamento, que transfere e amplifica a força impressa pelo operador ao pedal, de modo a produzir a frenagem do veículo (ERIKSSON, 2000).

No cenário mundial, a indústria de material de fricção e componentes para freios investe somas altíssimas em pesquisas científicas de modo à melhorar o desempenho de seus materiais. Estes estudos concentram-se principalmente na proposição de novas formulações de materiais de fricção e novas texturas de contato, visando a melhoria de desempenho e redução do desgaste dos elementos do sistema de freios. Para atingir tais feitos, análises teóricas utilizando simulações físicas associadas a experimentos práticos realizados em bancada e em campo são comumente realizados. A associação entre estudos teóricos e experimentais tem produzido grandes avanços principalmente no que tange a problemática de desgaste das matérias de atrito e o ruído e vibração produzidos durante a frenagem.

Estima-se que problemas vinculados ao ruído e vibração causados pelo desgaste dos sistemas de freios, geram prejuízos superiores a 100 milhões de euros por ano apenas na Europa (Ruzzi, 2004). Cabe destacar que mais da metade do custo de mercado dos materiais de fricção está vinculado aos gastos com P&D. Neste sentido, de acordo com Akay (2002), cerca de \$ 1 bilhão de reais foram gastos na América do Norte no início dos anos 2000, em estudos envolvendo testes de ruído, vibração e fricção para em sistemas de freios (NVH).

Dentro deste contexto, a FRAS-LE S.A, que constitui uma empresa cuja matriz está localizada na cidade de Caxias do Sul/RS e cujo segmento de atuação corresponde ao desenvolvimento, produção e comercialização de materiais de fricção e não fricção para a aplicação em sistemas de frenagem e suspensão; lidera o cenário brasileiro de ensaios de pastilhas e discos de freios em seu laboratório P&D, testando diversos parâmetros de influência sobre o desempenho de materiais empregados em tais aplicações.

Os ensaios são comumente executados em dinamômetros inerciais para testes de freios, visando reproduzir de forma fidedigna o comportamento dinâmico do sistema de frenagem de um veículo, utilizando para tanto os componentes originais do sistema de frenagem que compõem os veículos, a saber: pinça, pastilhas, disco, cubo de roda com rolamento, eixo, entre outros. De modo a guiar e padronizar as tarefas durante a execução do ensaio, empregam-se normas e/ou procedimentos específicos; os quais estabelecem o objetivo dos testes, as condições para sua execução, e a forma de avaliação do comportamento dos materiais/componentes ensaiados.

A pressão hidráulica ou pneumática (dependendo da concepção de sistema de freio utilizado) nos dinamômetros, é produzida e comandada por meio de uma servoválvula, que comanda o sistema de ar, estabelecendo a força de atuação tanto na pressão de contato e torque da frenagem, quanto a de desaceleração. Esse comando é feito por meio de um sistema controlador, que utiliza um controlador do tipo proporcional integral derivativo (PID) para ajustar seu comportamento. O controle do servo controlador normalmente usa o *feedback* da leitura de pressão de contato, podendo também usar o *feedback* da leitura de torque; ou, quando atua por desaceleração, o servo controlador controla o nível de torque necessário para realizar a desaceleração estipulada.

Um problema muito comum em ensaios de dinamômetro constitui as oscilações nos níveis de pressão/torque no controle PID da servoválvula de acionamento, fato que interfere diretamente na pressão de acionamento durante uma frenagem, e com isso pode produzir incertezas de medição nos valores de coeficiente de atrito, desgaste, ruído, entre outros parâmetros de saída dos ensaios.

Neste sentido, no presente trabalho de conclusão de curso (TCC) foram investigadas as fontes dos desajustes em servoválvulas que integram uma bancada de ensaios de sistemas de freios automotivos. Tal investigação visa a proposição de mecanismos de prevenção aos desajustes, juntamente com o desenvolvimento de métodos para facilitar o ajuste dos parâmetros de controle PID das servoválvulas, considerando as variadas configurações de ensaio empregadas e possíveis fontes de desajustes durante a execução dos ensaios.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é identificar os motivos dos desajustes do controle das servoválvulas que integram a bancada de ensaios de sistemas de freios automotivos do laboratório de P&D da FRAS-LE S.A, visando propor mecanismos de prevenção à sua ocorrência e o desenvolvimento de métodos para facilitar o ajuste dos parâmetros de controle PID das servoválvulas considerando as variadas configurações de ensaio empregadas, e as possíveis fontes de desajustes durante a sua execução.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para atender ao propósito principal do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados ao tema abordado no trabalho;
- Utilizar a ferramenta do diagrama de ISHIKAWA para nortear o trabalho e mapear problemas que geram diminuição na confiabilidade dos dados mensurados;
- Realizar ensaios com diferentes parâmetros/características envolvidas nos testes, fazendo um estudo comparativo para identificar possíveis causadores do problema;
- Desenvolver um método de cálculo que auxilie no processo de identificação de percentis de sobressinal e oscilações em níveis de pressão/torque medidos.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

No decorrer dos últimos anos foi verificado a necessidade de investigação dos problemas de ajuste do controle PID das servoválvulas que integram a bancada de ensaios de sistemas de freios automotivos do laboratório de P&D da FRAS-LE S.A, visando mitigar as incertezas de medição observadas nos ensaios de dinamômetros. Tais desajustes trazem prejuízos indiretos sobre a precisão dos resultados dos ensaios, pois as oscilações de pressão e torque comprometem a veracidade das leituras de coeficiente de atrito (calculado teoricamente usando esses dados). Esses desajustes também podem trazer prejuízos diretos a efetividade do ensaio, tendo em vista que diversas normas estabelecem limites para a variabilidade das incertezas de medição das variáveis de aplicação dos ensaios.

A norma ECE R90 (2020) por exemplo, que especifica os requisitos de projeto, construção, desempenho e protocolos de teste para lonas e pastilhas de freio de reposição para veículos rodoviários; em uma de suas seções indica que para aplicação constante de pressão sobre as lonas, deve ser aplicado um valor de 75 N/cm<sup>2</sup> com tolerância de  $\pm 10$  N/cm<sup>2</sup>, estabelecendo uma tolerância de 13,33 % em seu nível médio de pressão, não autorizando a oscilação ou sobressinal superior a esse valor.

Tendo em vista a importância da confiabilidade dos resultados dos ensaios dinamômetros realizados pelo laboratório de P&D da FRAS-LE S.A, a realização do TCC proposto é justificada uma vez que serão investigadas e identificadas as causas dessas oscilações recorrentes, e também propostas formas de otimizar o processo de calibração para o ajuste desses parâmetros.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TCC

Este estudo encontra-se estruturado em cinco capítulos, a saber:

- Capítulo 1: apresenta a temática do trabalho, assim como a justificativa para a sua realização, como também os objetivos a serem alcançados;
- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos assuntos relacionados ao tema abordado. Neste sentido, é feito um apanhado da literatura sobre: Sistema de freios, materiais de atrito, dinamômetros inerciais de freio, servoválvulas e controle;
- Capítulo 3: retrata a abordagem metodológica utilizada para a realização do trabalho, apresentando uma descrição sumária do planejamento experimental, preparação de ensaios e desenvolvimento de cálculo de erros.
- Capítulo 4: destina-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos;
- Capítulo 5: trata das considerações finais do trabalho, onde são relatadas as conclusões do estudo experimental e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, ao final do documento são listadas as referências bibliográficas que forneceram subsídios para a elaboração da revisão da literatura, estabelecimento da abordagem metodológica, e discussão dos resultados obtidos.

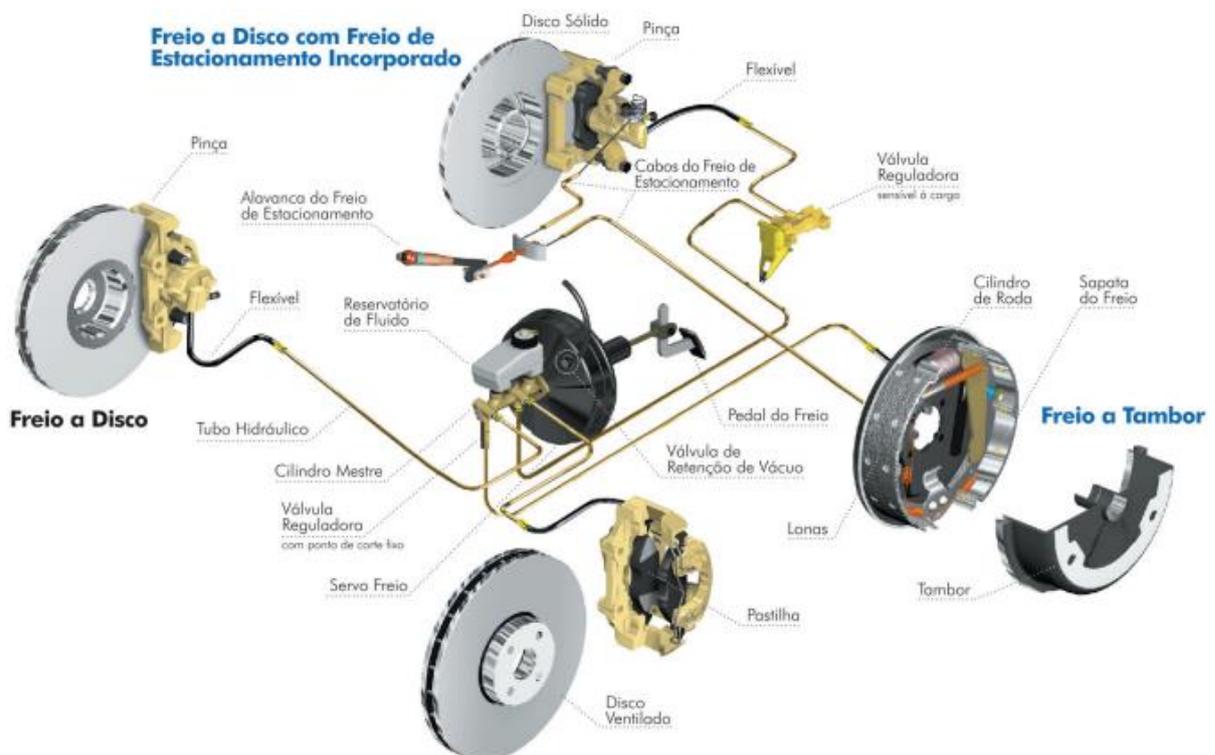
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SISTEMA DE FREIOS

Os sistemas de freios de veículos automotores são destinados a reduzir a sua velocidade e cessar o seu movimento, conforme desejo do condutor. Segundo Limpert (1999), o sistema de freio tem importância significativa na construção e elaboração de um projeto veicular, e deve ser tratado sempre como um item crítico de segurança. Para isso, deve atender à três funções principais: i) desacelerar o veículo até sua parada total; ii) manter controlada a velocidade do veículo em terrenos com declive; e, por fim, iii) manter o veículo parado quando estacionado.

Os sistemas de freios podem ser divididos por sua classificação de acionamento, em três principais tipos: hidráulico, pneumático e mecânico. Outrossim, pode também ser classificado pelos seus principais tipos de sistema: freio a disco e freio a tambor. Na Figura 1 pode-se observar a ilustração de um sistema hidráulico onde consta os dois tipos de sistema de freio: a disco no sistema dianteiro (linha frontal ao acionamento do pedal), e um sistema de freio a tambor na roda traseira esquerda. Essas diferentes concepções são detalhadas na sequência.

Figura 1 – Esquema de um sistema de freios hidráulico.

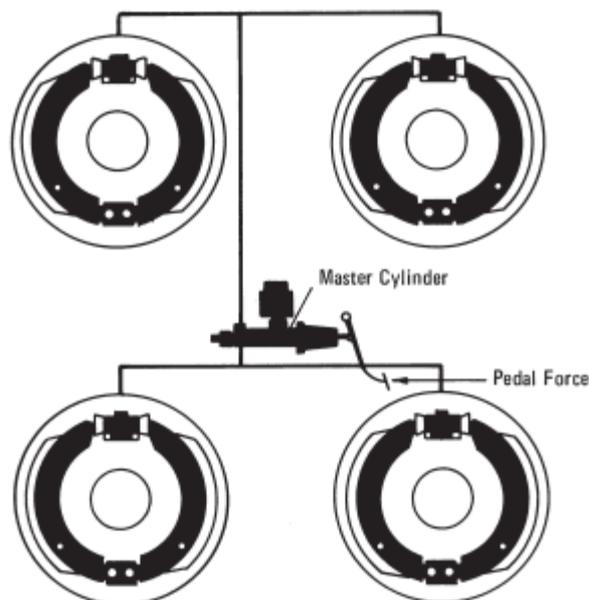


Fonte: (Controil,2014)

### 2.1.1 Sistema hidráulico de acionamento

O sistema hidráulico de freio (Figura 2) está presente na grande maioria dos veículos da linha leve no mercado automotivo mundial. Conforme Limpert (1999), neste sistema, quando o pedal é acionado pelo operador, faz-se uso do fator multiplicador da alavanca do pedal, o que produz o acionamento do cilindro mestre e equaliza toda pressão em seu circuito hidráulico. Essa pressão é feita através da compressão de um fluido (o popular fluido de freio), transmitindo a força que movimentam as pastilhas, ou suas respectivas lonas de freio, gerando a frenagem.

Figura 2 – Esquema de um sistema de freios com acionamento hidráulico.



Fonte: (Limpert, 1999).

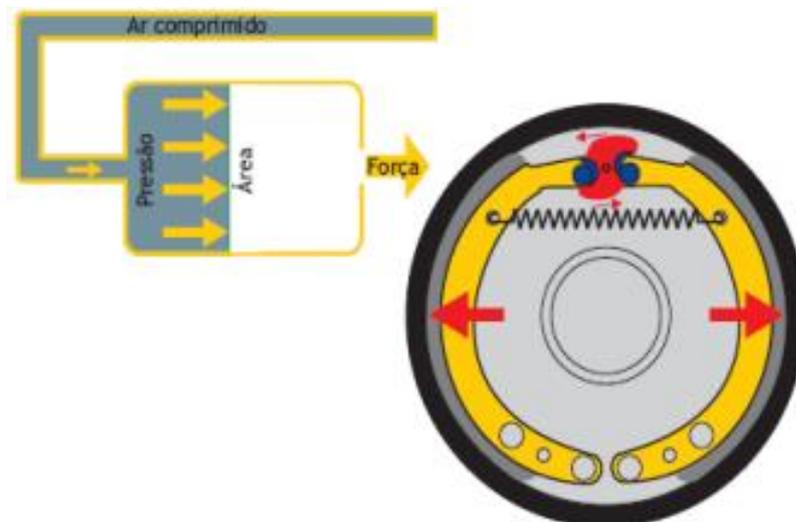
### 2.1.2 Sistema mecânico de acionamento

Os sistemas de freio com acionamento mecânico empregam a transmissão de força até as rodas por meio de cabos, alavancas, hastes, etc. São sistemas mais fáceis e baratos, sendo comumente utilizados em freios de estacionamento. Segundo Limpert (1999), a eficiência desse sistema de freio é de aproximadamente 65%, isso indica que 35% da força aplicada pelo operador é perdida diretamente ao acionar, o que faz com que esse sistema de freio seja pouco utilizado para projetos de freios principais de veículos automotores.

### 2.1.3 Sistema pneumático de acionamento

De acordo com Coelho (2014) os sistemas de freio com acionamento pneumático são aqueles que utilizam o ar comprimido para acionamento o sistema de freio do veículo. Essa configuração é muito comum no mercado da linha de veículos pesados, como por exemplo: caminhões, ônibus, reboques e semi reboques. É importante ressaltar que o pedal do freio nesse sistema, é utilizado apenas para modular a pressão do ar que vai para o montante, e não atua diretamente em um cilindro mestre, ao exemplo do hidráulico. Na Figura 3 pode-se observar o esquema de funcionamento de um sistema de freio a tambor, com acionamento pneumático.

Figura 3 – Esquema de um sistema de freios com acionamento pneumático.

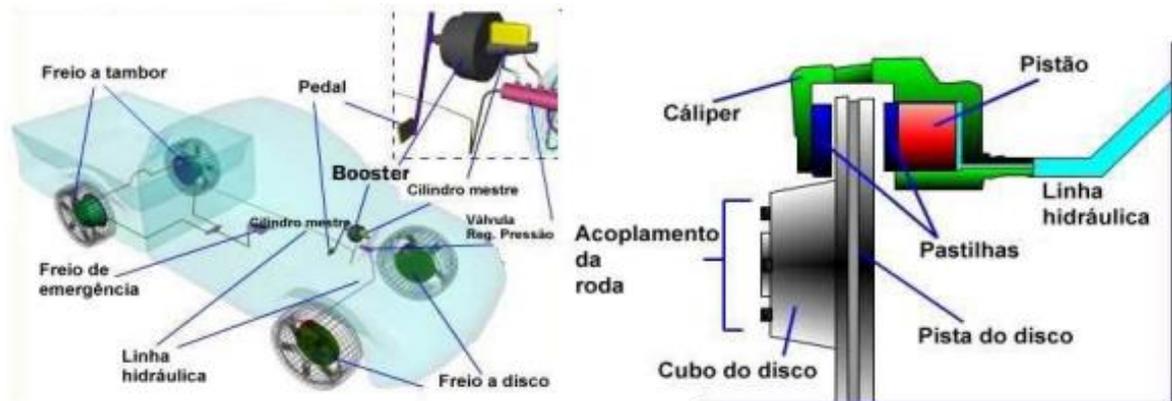


Fonte: (Thermoid, 2009)

### 2.1.4 Sistema de freio a disco

Segundo Limpert (1999), este sistema é composto por um disco, o qual é montado sobre o eixo e fixado ao cubo de roda. A Figura 4 contém um esquema que ilustra o seu princípio de funcionamento. Basicamente, o acionamento do pedal pressiona um pistão que desloca as pastilhas de freio, fazendo que o par de fricção (pastilha/disco) gere a frenagem, transformando a energia cinética do veículo em energia térmica, transmitida aos componentes do sistema de frenagem, que dissipam o calor. Este sistema é mais eficiente e de fácil manutenção quando comparado ao sistema de freio a tambor. Não obstante, na maioria dos automóveis da linha leve, o sistema de freio a disco é usado apenas nos eixos dianteiros, devido ao elevado custo dos seus componentes quando comparado àqueles que integram o sistema de freio a tambor.

Figura 4 – Diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de freios a disco automotivo.



Fonte: (UFPR, 2020)

### 2.1.5 Sistema de freio a tambor

O sistema de freio a tambor é predominantemente utilizado em veículos da linha pesada (ônibus e a maioria dos caminhões). O seu emprego em automóveis da linha leve se limita apenas aos eixos traseiros, e em papéis secundários de frenagem (freio de estacionamento). Os principais componentes de um freio a tambor estão ilustrados na Figura 5. Quando o freio é acionado, a câmara de serviço é pressurizada com ar, e desloca seu ajustador, que aplica um torque no eixo. Esse torque produz a movimentação das sapatas contra o tambor de freio, gerando o atrito do material das lonas, gerando a desaceleração do veículo. Pode-se observar na Figura 5 a presença de um ajustador automático, o qual é responsável por transformar o deslocamento linear da câmara de freio em deslocamento rotacional, ajustando também o seu curso gradualmente de acordo com o desgaste das lonas (BAKER, 1986).

Figura 5 – Ilustração de um freio a tambor evidenciando seus elementos constituintes



Fonte: Adaptado (Magioni et al., 2015)

## 2.2 PASTILHAS E LONAS DE FREIO

A lona de freio é o material de fricção utilizado em sistema de freio do tipo a tambor. Sua composição é classificada como material de atrito, e suas propriedades são muitas vezes antagônicas, dado o requisito de compor um material com alto coeficiente de atrito e elevada resistência ao desgaste simultaneamente. Conforme Limpert (1999), a lona de freio exerce uma pressão radial contra a superfície interna do tambor, reduzindo assim a rotação da roda e, conseqüentemente, a velocidade do veículo. Na Figura 6 são apresentadas fotografias de lonas de freio (a esquerda e central).

Figura 6 – Ilustração mostrando lonas de freio e pastilhas de freio (a esquerda e a direita da imagem, respectivamente).

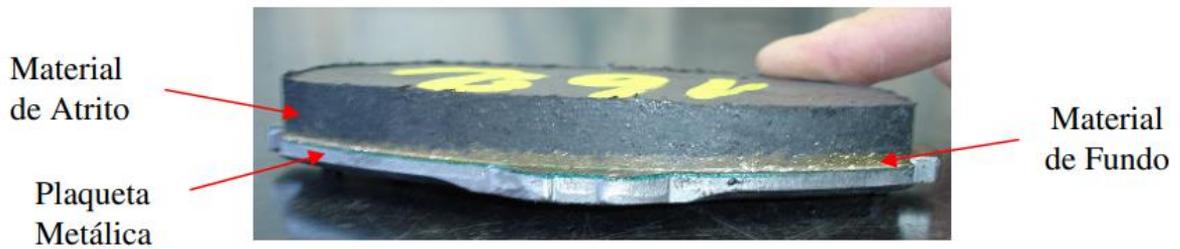


Fonte: (Valin Freios,2022)

As pastilhas de freio correspondem aos materiais de atrito utilizado em sistemas de freios a disco. Segundo Matozzo (2016), a estrutura das pastilhas de freios é geralmente segmentada em três partes, a saber: i) material de atrito, ii) plaqueta, e iii) material de fundo. Estas três partes têm como objetivo principal se juntar ao disco de freio, de modo a gerar a força contrária ao movimento, transformando assim a energia cinética do veículo em energia térmica transmitida aos seus componentes.

Segundo Mattozo (2016) a fragilidade do material de atrito, a plaqueta é feita a partir de materiais metálicos com o intuito de conferir maior resiliência, tenacidade e resistência ao conjunto. A Figura 7 mostra a seção lateral de uma pastilha de freio, mostrando a montagem do material de atrito sobre a plaqueta metálica, através da ligação produzida pelo material de fundo.

Figura 7 – Fotografia da seção transversal de uma pastilha de freio, evidenciando seus elementos constituintes.



Fonte: (Matozzo, 2016).

É importante ressaltar que dependendo dos objetivos propostos no projeto e nas especificações de fabricação das pastilhas, elas podem ter texturas superficiais e chanfros em seu material de atrito, ou também molas e chapas antirruídos nas plaquetas, afim de mitigar ruídos e desgaste, ou melhoria de desempenho do conjunto.

### 2.2.1 Materiais de atrito

Os materiais de atrito são compostos químicos formados por elementos complexos e desenvolvidos para resistir a condições de elevadas temperaturas e sob críticas solicitações mecânicas e tribológicas (MENETRIER, 2006). Segundo Matozo (2016), os grupos de materiais de atritos se dividem em duas classes principais, de acordo com sua formulação:

- i) Compostos Orgânicos Sem Asbesto, muito utilizado para clientes do mercado norte americano e asiático. Este composto tem como característica principal produzir um maior conforto e ergonomia ao dirigir, pois devido ao valor mais baixo do seu coeficiente de atrito (em torno de 0,35) as frenagens ficam mais suaves e o ruído diminui consideravelmente comparado aos compostos Semi-Metálicos;
- ii) Compostos Semi-Metálicos, os quais apresentam coeficiente de atrito mais elevado (em torno de 0,45), sendo comercializados principalmente no mercado europeu, pois nesse caso são indicados para frenagens que apresentam elevadas velocidades, desacelerações e temperaturas; condições sob as quais o sistema de frenagem tenha um melhor desempenho quando comparado aquele que emprega compostos orgânicos sem asbesto, independente do ruído emitido, pois esta característica é renegada a segundo plano nos requisitos europeus.

## 2.3 DINAMICA DE FRENAGEM

### 2.3.1 Pressão de frenagem

Segundo Halliday(1997), a pressão é a razão entre a força, aplicada perpendicularmente a uma superfície, pela sua área. Esse princípio físico é a base de um mecanismo de freio, seja ele utilizado um sistema de freios a tambor ou a disco.

Quando o sistema de freios é acionado pelo conduto através do pedal, o embolo do cilindro pressuriza o fluido produzindo o seu deslocamento através de suas linhas. Este deslocamento imprime uma força sobre o embolo da pinça, movimentando as pastilhas. Esse movimento se baseia no princípio de Pascal. Pela Eq. (1) pode-se observar que a força de frenagem ( $F_f$ ) de um sistema de freio a disco, de acordo com jogo de pressões e área, segue basicamente o princípio citado:

$$F_f = P_s * A_c \quad (1)$$

Assim, a força de frenagem ( $F_f$ ) que atua é resultado do produto entre a pressão do sistema ( $P_s$ ) e a área interna do cilindro de acionamento ( $A_c$ ). É importante ressaltar que em alguns veículos de alta performance, existem meios de diminuir a força de frenagem do sistema com auxílio de válvulas reguladoras de pressão, fazendo com que essa fórmula seja modificada de acordo com o uso da válvula.

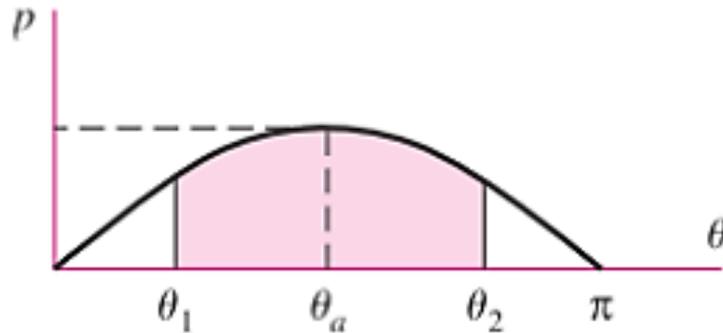
Em um sistemas de freios a tambor, de acordo com Norton (2013), a pressão exercida sobre a lona (considerando a teoria do desgaste uniforme, a simplificação do tambor girando em velocidade constante, e sendo os corpos do sistema rígidos), segue uma distribuição de ordem senoidal segundo a Eq. (2):

$$p = \frac{p_m * \sin \theta}{\sin \theta_m} \quad (2)$$

Nessa equação,  $p$  é a pressão diferencial na lona (dada em Pa),  $p_m$  é a pressão máxima suportada pelo material de atrito, e  $\theta$  é ângulo diferencial do arco da lona (dado em rad), juntamente com  $\theta_m$  que é o ângulo onde ocorre a pressão máxima.

Se considerarmos um ângulo de pressão máxima de  $90^\circ$  na Eq. (2), e os ângulos de pressão mínima com valores de  $0$  e  $180^\circ$ , obtém-se uma distribuição senoidal da pressão, a qual é ilustrada na Figura 8.

Figura 8 – Esquema indicando a variação da pressão no tambor em função do ângulo diferencial do arco da lona.



Fonte: (Budynas, 2016)

### 2.3.2 Torque de frenagem

O torque de frenagem é essencialmente a potência do sistema de frenagem. A pinça do sistema de freio atua no disco a uma certa distância do centro do cubo, conhecido como raio efetivo. A força exercida pela pinça, multiplicada pelo raio efetivo do sistema, é igual ao torque de frenagem.

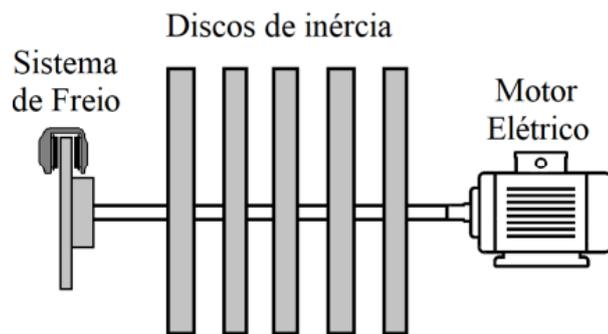
## 2.4 ENSAIOS EM LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE FREIO

### 2.4.1 Ensaio de atrito em dinamômetro

Segundo Caixeta (2017) o dinamômetro inercial é um equipamento que simula uma operação de frenagem, diferentemente dos ensaios em campo, onde vigoram as condições reais de operação, no dinamômetro inercial são controlados tanto parâmetros ambientais como temperatura e umidade relativa do ar, quanto os parâmetros físicos como a pressão aplicada, torque gerado, etc. Dessa forma, tem-se a capacidade de reproduzir em laboratório as condições reais de operação, variando-se as condições operacionais de um tribosistema com severidade mais branda para um mais agressivo. Com isso consegue-se atender aos objetivos e preceitos estabelecidos em normas, que regulamentam a comercialização de pastilhas e lonas de freio segundo os requisitos mínimos de desempenho estipulados pelo mercado. É importante ressaltar que se elevada a capacidade de instrumentação desta configuração de tribômetro, pode-se produzir mais resultados pertinentes ao projeto e fabricação de tais componentes dos sistemas de freio e mapear o desempenho global do produto.

Segundo Infantini (2008), o dinamômetro inercial é o tribômetro que melhor reproduz as condições de frenagem, pois utiliza um sistema que simula a energia cinética do veículo através da rotação de discos de inércia. Na Figura 9 é mostrado o esquema de um dinamômetro inercial com um sistema de freio a disco montado sobre, juntamente com o motor e discos de inércias que integram o equipamento.

Figura 9 – Esquema ilustrativo de um dinamômetro inercial.



Fonte: (Infantini, 2008)

#### 2.4.1.1 Servoválvula

As servoválvulas constituem válvulas que funcionam com intuito de direcionar fluxo, quantidade de vazão e pressão de um fluido que percorre um sistema. Sua vantagem está no funcionamento dinâmico do sistema hidráulico, em movimento contínuo, sem interrupções. No caso da servoválvula dos dinamômetros inerciais de freios, esta comanda o sistema de ar para ditar a força de atuação tanto da pressão, como do torque da frenagem. A Figura 10 ilustra a servoválvula utilizada neste trabalho.

Figura 10 – Ilustração de uma servoválvula.



Fonte: (Moog, 2012)

Em sua estrutura, a servoválvula tem ajuste para duas saídas, uma para o sistema hidráulico, outra para o sistema pneumático. No primeiro caso, o atuador aciona um cilindro mestre e assim efetua a frenagem. No segundo caso é a um transdutor pneumático que atua e controla a pressão de ar e regula a frenagem

#### 2.4.1.2 Controle PID

O controle PID fornece uma variação contínua da saída dentro de um mecanismo de realimentação da malha de controle, tendo como objetivo regular com precisão a resposta do sistema, removendo a oscilação, o erro em regime permanente e adequando a velocidade de subida e assentamento, assim aumentando a eficiência do processo.

Em se referindo ao controle do sistema, são citados os principais parâmetros de resposta do processo, sendo estes:

- Tempo de subida: tempo ao qual a variável manipulada responde para atingir de 10 a 90% do valor de referência;
- Sobressinal: também indicado pelo termo análogo inglês *overshoot*, indica em pontos percentuais o quanto foi ultrapassado o valor de referência durante a subida da resposta;
- Tempo de assentamento: é o tempo que a planta leva para estabilizar dentro de uma faixa de 2% para mais ou para menos do valor de referência;
- Erro de regime: considerando referências constantes, este é o erro percentual em regime estacionário; e,
- Estabilidade: é o termo designado para definir se a planta converge para um valor fixo.

A sigla PID vem da inicial das três componentes constituintes do compensador, Proporcional, Integral e Derivativo:

A componente proporcional tem como objetivo regular a resposta ao erro instantâneo, comumente acelerando o tempo de subida da variável de processo. Ainda como efeitos do controle proporcional são verificados o aumento do sobressinal, a diminuição do erro de rastreamento ao degrau e degradação da estabilidade.

O integrador, por sua vez, não modifica de forma satisfatória ou prejudica o tempo de subida, e também aumenta o sobressinal na resposta ao passo, porém, elimina o erro em regime permanente. Esta é a principal característica da componente integral, ao passo que aumenta o tempo de assentamento.

O derivativo do compensador tem como principal objetivo o aumento da estabilidade do processo, diminuindo o sobressinal e, conseqüentemente, o tempo de assentamento da variável de processo; influenciando pouco no erro de regime permanente e no tempo de subida.

As características citadas no texto são compiladas na Tabela 1.

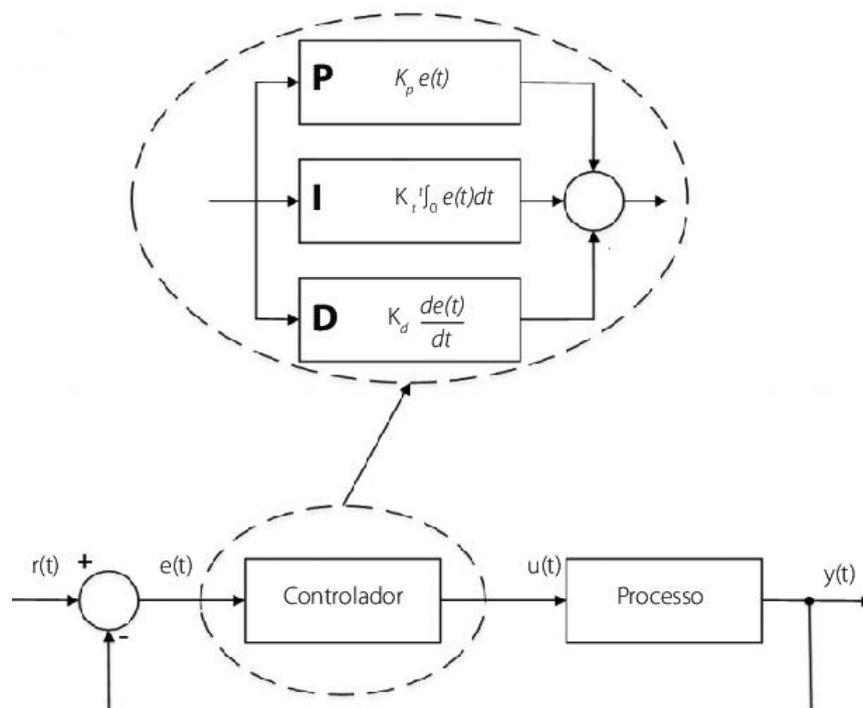
Tabela 1 – Componentes dos sistemas PID.

|          | <b>Tempo de subida</b> | <b>Sobressinal</b> | <b>Tempo de assentamento</b> | <b>Erro regime</b> | <b>Estabilidade</b> |
|----------|------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|
| <b>P</b> | Diminui                | Aumenta            | Indiferente                  | Diminui            | Degrada             |
| <b>I</b> | Indiferente            | Aumenta            | Aumenta                      | Elimina            | Degrada             |
| <b>D</b> | Indiferente            | Diminui            | Diminui                      | Indiferente        | Melhora             |

Fonte: (O autor).

Na malha de controle o compensador PID tem como entrada o erro instantâneo, e como saída a ação de controle. Dentro de sua estrutura, ilustrada na Figura 11, o controlador realiza a multiplicação dos ganhos proporcional, integral e derivativo ao erro instantâneo, a integral do erro e a sua derivada ao longo das amostras, respectivamente; e após o cálculo individual, a ação de controle é definida como a soma destas três componentes.

Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de controle PID.



Fonte: (Pires,2018)

O controlador PID é vastamente utilizado industrialmente por permitir, de forma empírica, a sintonia dos dados de leitura de processos; e ao mesmo tempo permitir que um grande número destes possa alcançar uma sintonia fina graças a união das suas características, permitindo a qualidade da resposta da variável medida em função do tempo. Alguns autores na literatura indicam a possibilidade de operações de refino dos dados de controle PID sem conhecimento de modelos matemáticos da planta e, ainda, indicam algoritmos para ajuste automático do controle de acordo com resposta desejada.

Frente ao exposto, neste trabalho de conclusão de curso far-se-á uso de tais sistemas para refinar os dados de saída coletados a partir da realização e ensaios de caracterização, em dinamômetro inercial, de desempenho de elementos de fricção de sistemas de frenagem.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os materiais e procedimentos experimentais adotados para a realização do trabalho proposto, buscando atender aos objetivos geral e específicos estabelecidos na seção 1.2 do trabalho de conclusão de curso.

#### 3.1 DIAGRAMA ISHIKAWA

Como forma de organizar as demandas e nortear o estudo, na primeira fase do trabalho experimental teve como propósito o levantamento de informações e organização e planejamento de ideias. Por meio de entrevistas realizadas juntos a engenheiros, analistas e técnicos, foi construído um diagrama Ishikawa apontando e mapeando possíveis causas de problemas no controle PID, cujas consequências podem minimizar a confiabilidade dos resultados dos ensaios dinamométricos.

De acordo com o diagrama Ishikawa, os problemas relacionados foram separados em cinco tópicos

- Máquinas: problemas ocasionados por algum desvio de componente da máquina, por exemplo: servoválvula velha, falta de manutenção, etc.;
- Método: nesse tópico foi separado as criticidades do processo ou método de trabalho, que geram a redução da confiabilidade no controle PID. Ex.: falta de rotinas de calibração de controle;
- Meio ambiente: problemas ligados ao controle PID que tenham como causa raiz a característica do ambiente de trabalho, ou aspectos de clima. Ex.: sujeira dos maquinários.
- Material: para essa tópico, foram apontados todos os problemas ligados a qualidade de materiais e bens consumeis de um ensaio. Ex.: pastilha, disco, fluido, etc.
- Mão de obra: problemas de controle ligados a mão de obra. Ex.: exemplo: falta de treinamento para identificar problemas e parar um ensaio;

Na Tabela 2, então indicados os tópicos elencados como prioritários na investigação e estudo aqui realizado, segundo o diagrama Ishikawa.

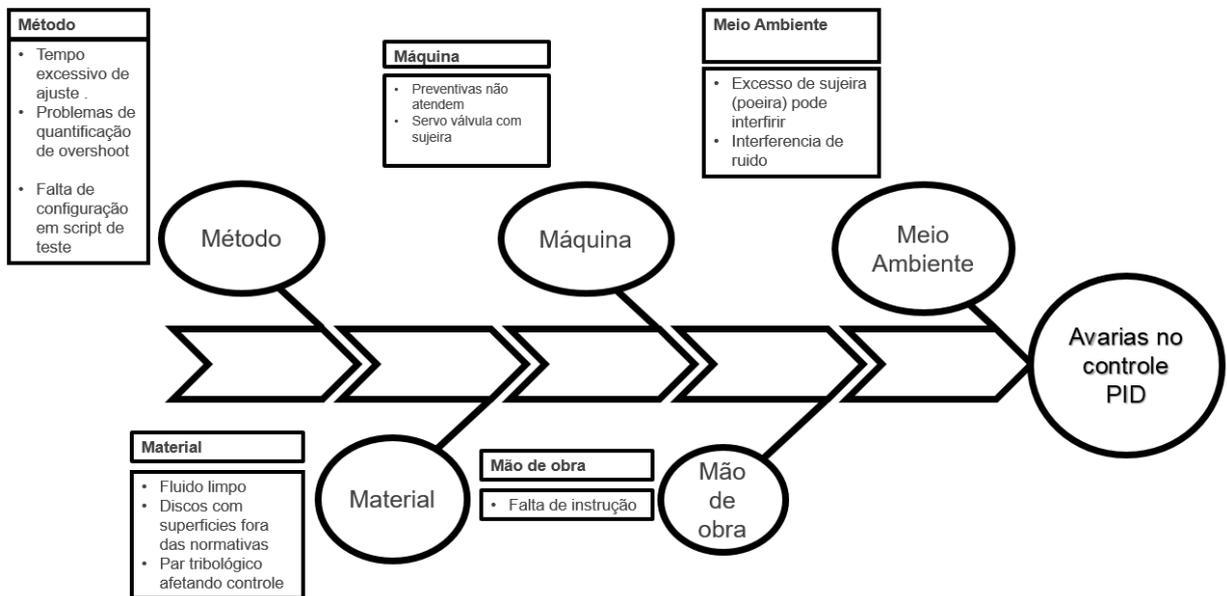
Tabela 2 – Tópicos prioritários deste estudo, segundo o diagrama Ishikawa.

| Tópico | Máquina                           | Método  | Meio-ambiente                   | Material                                    | Mão de obra                |
|--------|-----------------------------------|---|---------------------------------|---|----------------------------|
| 1      | Preventivas não atendem demanda   | Tempo excessivo de ajuste                     | Excesso de sujeira              | Fluido limpo                                | Falta de instrução         |
| 2      | Servoválvula com problemas        | Problemas de quantificação de overshoot/nível | Alto índice de ruído no sistema | Discos com superfície dentro das normativas | Dificuldade na compreensão |
| 3      | Instrumentação fora de calibração | Falta de configuração de servo em script      | -                               | Par tribológico afetando o controle         |                            |

Fonte: (O autor)

Como forma de ilustrar esses tópicos prioritários, construiu-se um diagrama do tipo espinha de peixe (Ishikawa), o qual é ilustrado na Figura 12, e cuja construção foi efetuada levando em conta os tópicos citados na Tabela 2.

Figura 12 – Diagrama Ishikawa.



Fonte: (O autor)

Com os tópicos ilustrados no diagrama da Figura 12, foram elencadas algumas demandas principais para nortear o estudo. Para verificação dos apontamentos e se aprofundar nos cinco tópicos propostos pelo diagrama Ishikawa, foram planejados:

- Estudos comparativos em ensaio de dinamômetro;
- Estudos comparativos em ensaio de dureza; e,
- Estudos de casos;

### 3.2 ENSAIO DE DINAMÔMETRO

Os ensaios de dinamômetros foram executados nas dependências do laboratório P&D da FRAS-LE S.A. A estrutura física deste laboratório conta com o aporte de dezessete dinamômetros inercias de freio, sendo destes dez para ensaios de freios da linha leve e linha comercial. Os dinamômetros contêm um sistema de componentes que comportam diversas aplicações, sendo elas para veículos da linha leve: carros, picapes, motos; quanto da linha pesadas: caminhões, ônibus, trens. A escolha do dinamômetro é feita pela carga que vai ser empregada durante o teste, juntamente com o objetivo de sua realização e os resultados desejados. Isso em função dos dinamômetros, em alguns casos, serem instrumentados para resultados específicos, como por exemplo as máquinas que recebem isolamento acústico e sensores com captação de ruídos. Todo esse aparato direcionado faz com que a confiabilidade dos resultados obtidos para esta aplicabilidade aumente comparado a dinamômetros apenas com adaptações de sensores.

Durante a realização deste estudo foram executados ensaios comparativos direcionados para a investigação de alguns pontos pré-determinados, mas ao mesmo tempo também foram feitos estudos de caso que ocorreram em programação normal dos ensaios recorrentes realizados no laboratório. Os dois estudos comparativos que foram executados serão explicados nos tópicos 3.4 e 3.5 deste capítulo, sendo realizados em um dinamômetro inercial de freio tipo A, demonstrado na Figura 13, o qual conta com as características indicadas na Tabela 3.

Figura 13 – Dinamômetro inercial tipo A.



Fonte: (O autor)

Tabela 3 – Características do dinamômetro.

| <b>Equipamento</b> | <b>Acionamento</b> | <b>Freio</b> | <b>Cilindro mestre</b> | <b>Sistema</b>             | <b>Amostras</b> |
|--------------------|--------------------|--------------|------------------------|----------------------------|-----------------|
| Tipo A             | Hidráulico         | Disco        | 25,4 mm                | <i>Link Control System</i> | Pastilhas       |

Fonte: (O autor)

Para os estudos de casos usuais do laboratório foi utilizada toda demanda disponível de dinamômetros da linha leve e comercial que tiverem sistema Link, e que durante o período de investigação vieram a dar problemas em seu controle PID. Esse estudo de caso será explicado no tópico 3.6 deste capítulo.

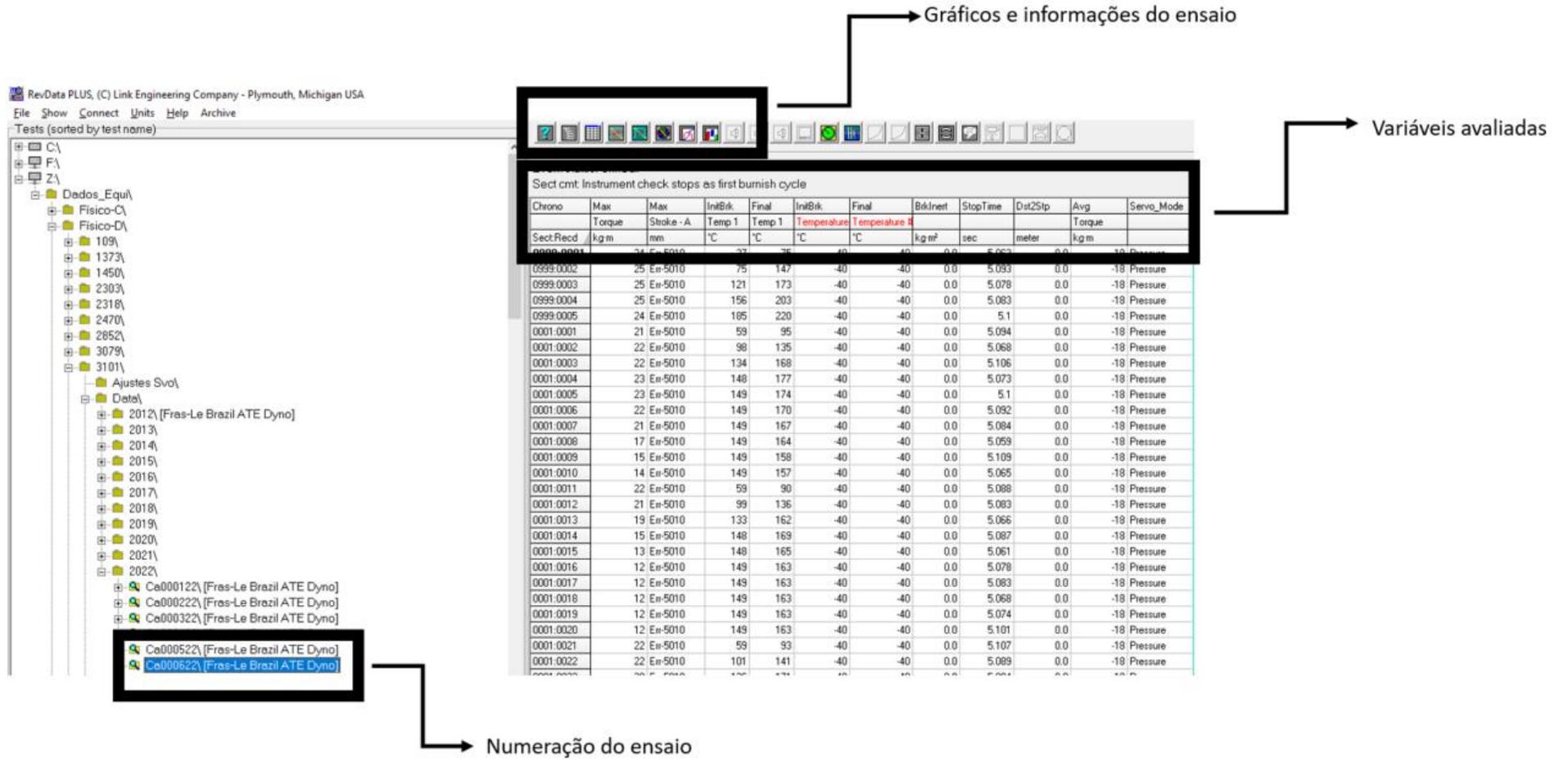
### 3.2.1 Software de análise de dados e configurações de controle

O processamento, armazenamento e visualização de dados brutos dos ensaios são feitos através de um software desenvolvido pela *Link Engineering*, fabricante do equipamento. É importante ressaltar que esse software é flexível em sua programação, e o operador pode escolher os dados que deseja visualizar, podendo também introduzir observações, realizar medições e, através de fórmulas específicas, poder também programar novos mensurados indiretos que deseja visualizar tanto após ensaio, quanto durante a operação do dinamômetro.

Neste software também é possível plotar gráficos e informações em tempo real durante a execução dos ensaios, podendo com isso ajustar parâmetros de controle de acordo com o comportamento dinâmico do sistema de freio que esta sendo testado. Na Figura 14 é mostrado o layout de visualização do RevData PLUS.

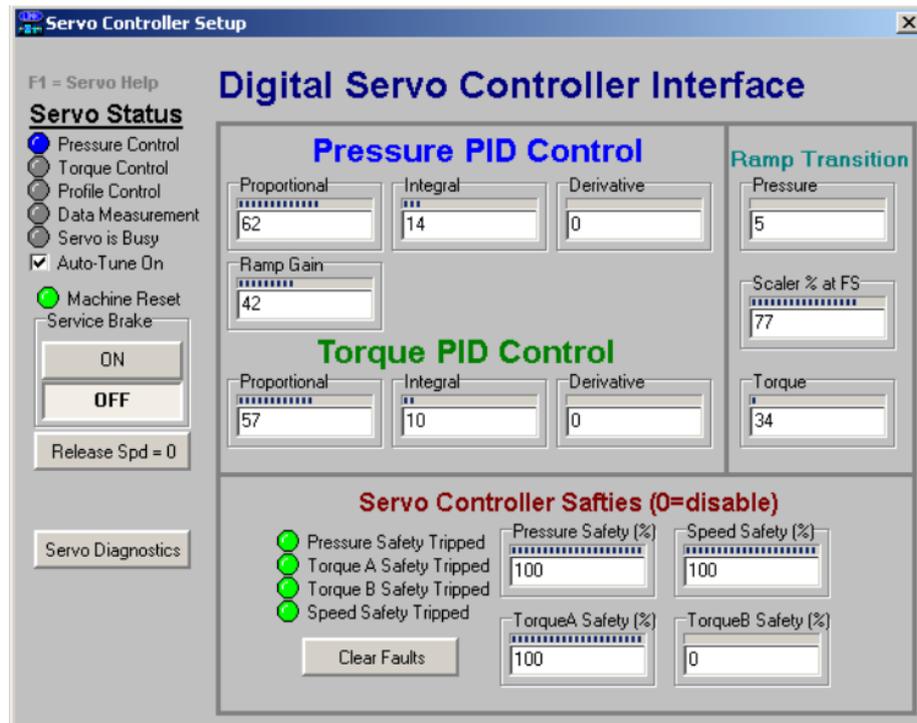
O software também é responsável por atuar diretamente no controlador e ajustar os parâmetros de seu PID. Essa função é importante para calibração dos controles para cada sistema de freio que for testado. O seu uso diretamente em software faz com que fique mais fácil e pratico o manuseio e visualização de modificações realizadas no ensaio durante a sua execução. Pode-se verificar a tela utilizada para mudança de parâmetros na Figura 15.

Figura 14 – Layout de visualização do *software* RevData PLUS utilizado no controle do dinamômetro inercial tipo A.



Fonte: (O autor)

Figura 15 – Tela utilizada para efetuar a mudança de parâmetros de ensaio durante a sua realização.



Fonte: (O autor)

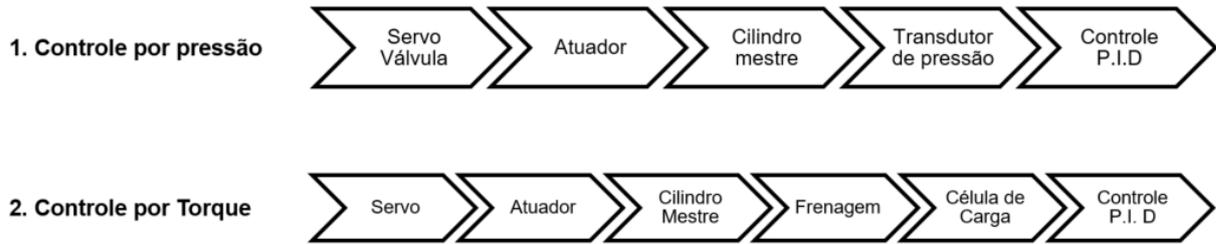
### 3.2.2 Controle PID no processo de frenagem

Conforme revisado no tópico 2.1, o sistema de freio de um automóvel, quando acionado, transforma a força impressa pelo condutor em pressão no sistema de frenagem, seja este de acionamento hidráulico ou pneumático, gerando como consequência da pressão, a força e o torque necessário para produzir a desaceleração do veículo.

Os dinamômetros seguem a mesma linha de raciocínio dos carros de rua, porém quem dita a pressão de frenagem do sistema é a servoválvula do dinamômetro, a qual, por sua vez, é comandada pelo controlador e alimentada por um método e script, fazendo então com que os parâmetros de teste sejam fielmente reproduzidos conforme planejamento prévio.

O Sistema PID dos dinamômetros trabalha em malha fechada, podendo ser configurado de duas maneiras, conforme exemplificado na Figura 16.

Figura 16 – Configurações possíveis para o controle dos dinamômetros via sistema PID.



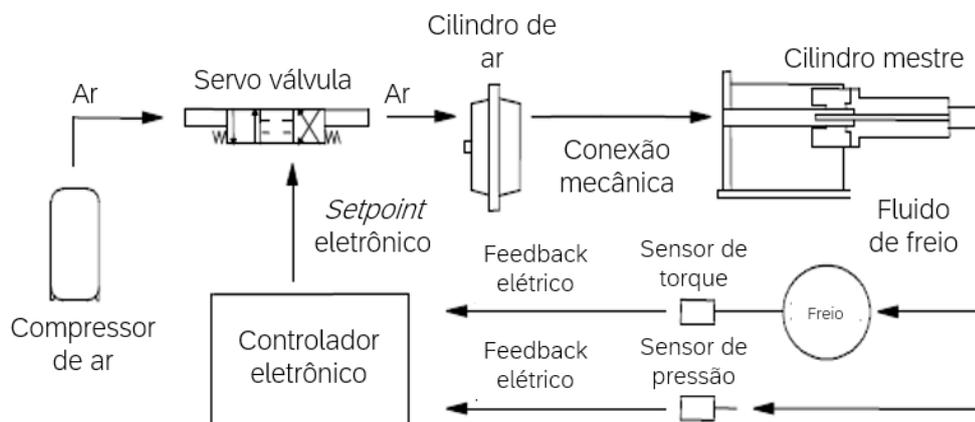
Fonte: (O autor)

No controle por pressão, é do tipo de malha fechada, não se observando o comportamento dinâmico do par tribológico e suas consequências no sistema, pois o controlador afere o sinal do transdutor de pressão, ajustando a variável estebelecida como referência, e assim controlando a aplicação do cilindro para a pressão estipulada.

No controle por torque, a malha observa a dinâmica da frenagem, usando um fator de consequência da frenagem como referência. O torque de frenagem é medido por uma célula de carga, após a aplicação, assim enviando sinal para o controlador aumentar ou diminuir a aplicação no cilindro conforme o torque configurado como padrão daquela aplicação.

Pode-se observar na Figura 17 as duas malhas fechadas de controle do servomotor. Os caminhos que levam a servoválvula a começar a frenagem, até a resposta novamente de seu controlador, se diferem pelo sensor utilizado nos dois tipos de controle. Enquanto o transdutor de pressão faz a leitura apenas da pressão interna do sistema, o torque de frenagem através da célula de carga depende do comportamento do freio para fechar o ciclo, fazendo com que diversas variáveis entrem em jogo.

Figura 17 – Malha fechada controle PID dinamômetro

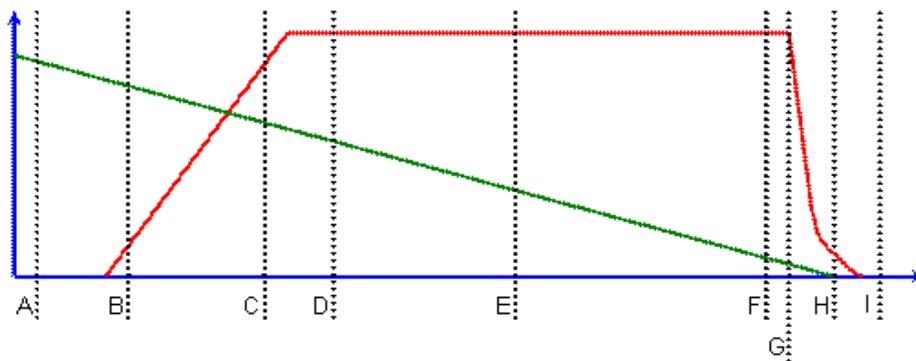


Fonte: (Link,2009)

### 3.2.2.1 Regimes de controle

Uma frenagem em dinamômetro pode ser dividida em três momentos importantes levando em conta um comportamento gráfico de pressão e torque (Figura 18). No seu primeiro momento, onde é efetuado a aplicação, tem-se uma rampa de subida nos valores da pressão. Essa rampa em um ensaio em campo corresponde a força aplicada pelo condutor do automóvel sobre o pedal do sistema de freio; já no dinamômetro, é configurada por uma taxa de pressão (medida em bar) ao longo do tempo (medido em segundos), recebendo a denominação de '*rampe rate*'. O segundo momento importante é o controle para manter o parâmetro configurado inicialmente dentro das tolerâncias desejadas, ou seja, manter o valor do torque ou pressão aplicado constante no nível especificado, sem qualquer taxa de variação que comprometa os resultados e possa invalidar o ensaio. E, por fim, o último parâmetro é a saída de pressão, onde o freio é desacoimado até chegar a pressão com valor de referência zero. Na Figura 1 pode-se observar os três momentos importantes: rampa de subida (entre pontos B e C), nível (entre os pontos D e F) e descida (entre os pontos G e I).

Figura 18 – Diagrama da evolução do torque e pressão durante um ensaio dinanométrico.



Fonte: (O autor)

Ainda levando em conta o gráfico de frenagem mostrado na Figura 18, é importante entender o que cada ponto indicado pelas letras (A, B, C, D, E, F, G, H, I) representam para o software de controle do ensaio. Importante ressaltar que a linha vermelha é a representação do ciclo de torque ou pressão e a linha verde é a velocidade diminuindo de acordo com processo de frenagem. Esse conhecimento é importante para uma programação de variáveis de um mensurando indireto que seja necessário calcular. Para exemplificar, se caso o operador queira verificar o tempo total de frenagem ele irá escolher a variável tempo, programada para retirar

dados de ‘A’ a ‘I’. A Tabela 4 descreve o significado de cada um destes pontos, segundo manual de operação de controle da LINK.

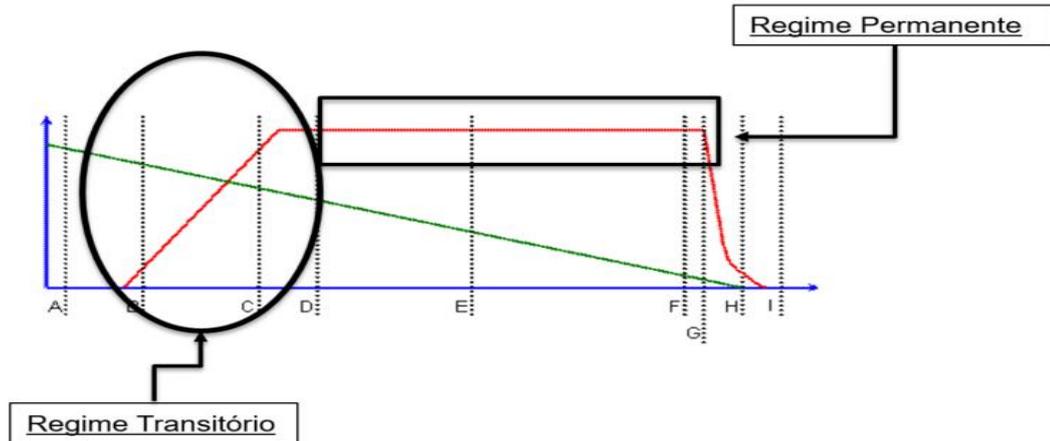
Tabela 4 – Significado de cada ponto indicado no diagrama da Figura 18.

| Ponto na frenagem | Leitura no software  |
|-------------------|--|
| A                 | Tempo que o controlador do servo aplica sinal para iniciar a frenagem  |
| B                 | Primeiro ‘ <i>threshold</i> ’: valor que inicia a contagem da frenagem depois de 0, de acordo com valor setado para esse início.       |
| C                 | Ponto antes de chegar no nível configurado do sistema (1% antes do fundo de escala)  |
| D                 | Ponto que começa a regularizar e ficar constante no nível solicitado de aplicação  |
| E                 | Ponto considerado intermediário da frenagem, exatamente o ponto do meio do tempo de ciclo no regime permanente                         |
| F                 | Último ponto antes de a liberação real do freio  |
| G                 | Ponto que o freio é liberado   |
| H                 | Segundo ‘ <i>threshold</i> ’: valor que finaliza a contagem da frenagem antes de chegar 0, de acordo com valor setado para esse final. |
| I                 | Último ponto de registro de dados  |

Fonte: (O autor)

Na Tabela 4 pode-se observar onde e como o software lê cada ponto dentro de um ciclo de frenagem. Esses pontos serão importantíssimos para criação de uma ferramenta de quantificação de percentil de erros nos regimes de controle, o que será explicado mais profundamente no tópico 3.3. Dentro do controle PID da servoválvula do dinamômetro, é feito um estudo e análise dos dois principais regimes que são visíveis nos diagramas de evolução do torque e pressão durante o ensaio. Trata-se dos regimes transitórios e permanentes. Na Figura 19 pode-se observar atentamente onde que se encontra esses regimes, juntamente com os principais problemas que possam a vir ocorrer, os quais serão descritos no item 3.2.2.2.

Figura 19 – Indicação dos regimes transitório e permanentes no diagrama da Figura 18



Fonte: (O autor)

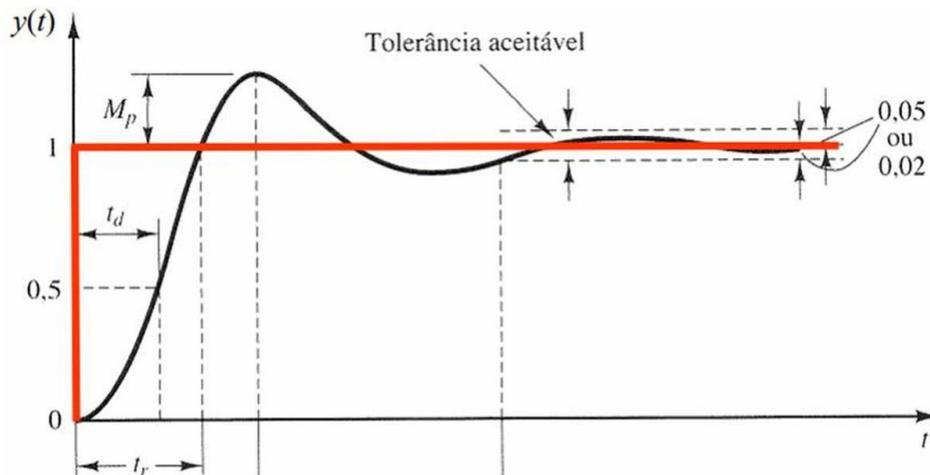
### 3.2.2.2 Problemas recorrentes

Dentro do contexto de aplicação do freio, ao se olhar para os regimes presentes no controle PID, pode-se observar algumas falhas recorrentes, que fazem com que o sistema, de certa forma, perca a confiabilidade. O principal problema ocorre no regime transitório, e pode-se chamar de sobressinal (*Overshoot*). O sobressinal constitui um pico de pressão ou torque gerado no final da rampa de entrada, e que gera problemas em métodos que exigem a aferição de maior ponto, pois desse jeito a ocorrência do *overshoot* mascara o resultado médio de pressão ou torque medido durante o ensaio.

O outro problema recorrente ocorre no regime permanente de controle, trata-se um delta de variação nos valores da pressão ou torque. Esse tipo de problema acontece principalmente quando, por razões diversas, o nível da aplicação não consegue se manter constante no valor setado na programação do equipamento.

A Figura 20 indica as tolerâncias mínimas que o controlador do dinamômetro consegue atingir no âmbito sobressinal e erro em permanente, conforme manual do servocontrole disponibilizado pela Link. Ao avaliar uma curva de controle por pressão, o sobressinal ( $M_p$ ) aceitável está em até 3,5% do fundo de escala, enquanto erro no regime permanente está em aproximadamente 0,5% do fundo de escala. Quando avaliamos o controle por torque, o valor aceitável aumenta para 4% do fundo de escala, enquanto o erro fica em aproximadamente 1,5%.

Figura 20 – Variação aceitável nos valores de leitura da servoválvula.



Fonte: (O autor)

É importante ressaltar que o próprio manual do servocontrole disponibilizado pela Link já aponta o controle por torque como a principal fonte de problemas quando se refere ao acerto e calibração dos parâmetros PID do sistema de acionamento.

### 3.3 QUANTIFICAÇÃO DE PERCENTIL DE ERRO NOS REGIMES DO SISTEMA

A avaliação numérica e quantificação de parâmetros é de extrema importância para um comparativo de qualquer âmbito. Dessa forma, o primeiro passo deste trabalho, após o mapeamento de problemas, está na quantificação dos erros citados no item 3.2.2.2.

Essa demanda se faz presente em dois momentos principais de utilização da ferramenta, a saber: i) pré ensaio e durante o ensaio; e ii) pós ensaio. No primeiro caso se refere a parte da configuração e calibração do sistema no pré e durante o ensaio, com intuito de otimizar o trabalho das equipes de manutenção, aumentar a confiabilidade dos resultados e mitigar problemas mapeados no tópico 3.1, como: tempo excessivo de ajuste, problemas de quantificação de *overshoot*/erro, e a falta de configuração no script do ensaio.

Essa ferramenta foi pensada para quantificar o erro, seja ele em regime permanente ou transitório, podendo assim levar o operador de calibração do PID a ter resultados mais assertivos em sua operação. Esse ponto foi levantado pois o método de ajuste do controle até então era efetuado na forma da tentativa e erro, mudando ajustes e verificando apenas visualmente os gráficos se o sistema melhorou ou piorou com as mudanças. Conforme Figura 21 pode-se observar a visão do operador ao mudar os parâmetros de um ensaio, apenas com essa visualização qualitativa e não quantitativa.

No caso da Figura 21, como o sistema estava em uma variação grande, é visível uma melhora significativa nos dados plotados graficamente. Porém, a falha nesta operação está em

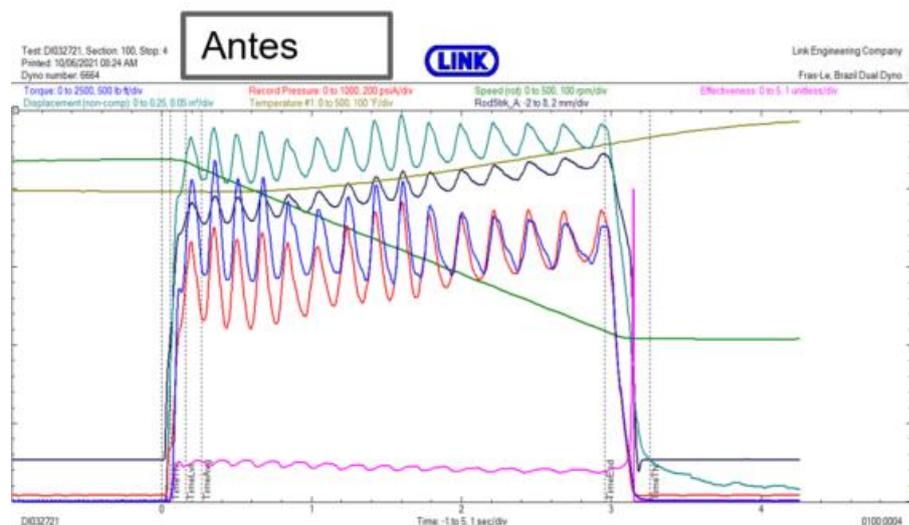
pontos como: mudanças de escalas no gráfico podem fazer o operador perder a referência, e ajustes finos de controle são inviáveis dessa forma.

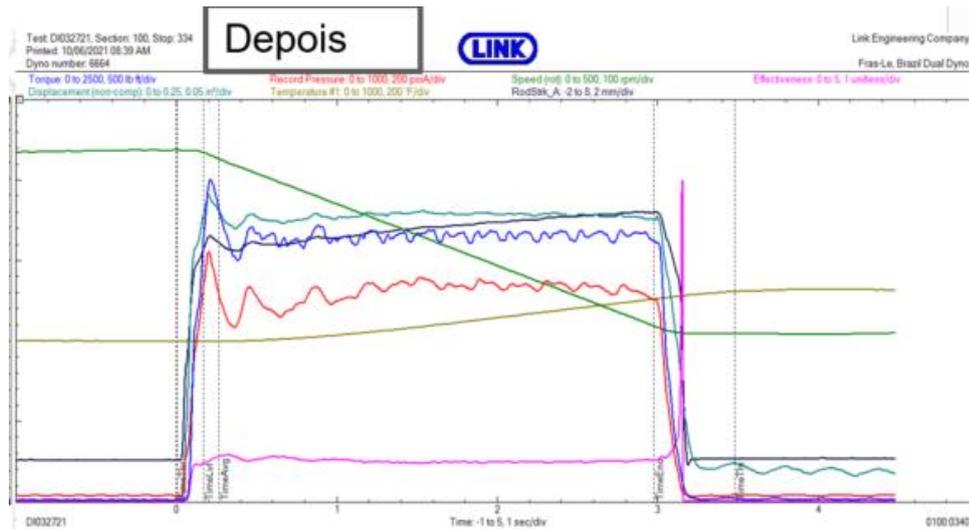
Levando em conta os três pontos a serem sanados do diagrama Ishikawa, foram elencadas três palavras chaves para essa operação: tempo, quantificação e planejamento. Pensando na questão de facilidade na quantificação, otimização do tempo e uma flexibilidade de planejamento, foi estipulado que esta ferramenta deveria ser feita e construída considerando fórmulas e programação dentro da plataforma do RevData PLUS, software utilizado pela LINK e detalhado na seção 3.2.1. Essa escolha facilita a utilização da ferramenta, logo que será em conjunto com o software de ajuste de parâmetro, não precisando abrir outra plataforma ou aplicativo para sua quantificação, otimizando o tempo de calibração e, conseqüentemente, deixando a máquina menos tempo parada para ajuste.

Porém, essa quantificação se faz necessária também para um âmbito pós ensaios, visto que é de suma importância para as análises e comparativos ver a qualidade do controle em um contexto maior, pegando por exemplo uma média de todas as frenagens; e verificando qual seu erro médio em todo ensaio, afim de validar se está dentro de uma normativa, ou se os seus resultados estão confiáveis.

Essa ferramenta foi desenhada para análise de estudo e utilização pela equipe de engenheiros e analistas visando propósito comparativo pós ensaio. Portanto, esse modelo matemático foi escolhido para ser feito e programado em planilhas do Excel®, por ser o mesmo software utilizado para criação de relatórios, facilitando assim um trabalho comparativo.

Figura 21 – Comparativo entre as leituras efetuadas durante os ensaios antes e após a quantificação dos percentis de erros de leitura.





Fonte: (O autor)

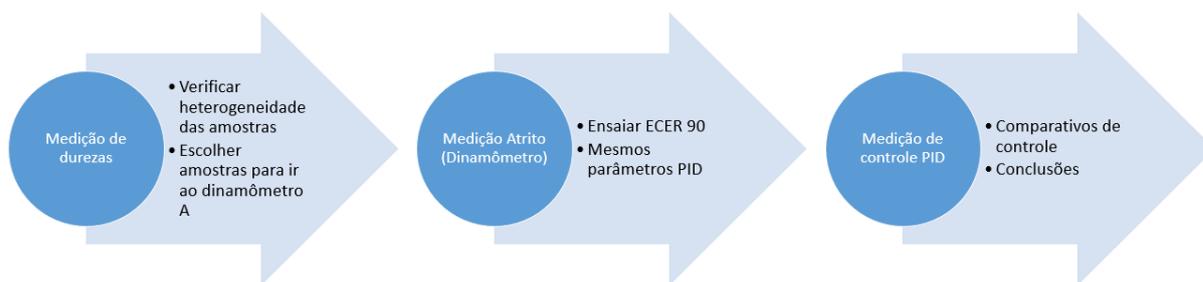
### 3.4 COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS DE ATRITO

Esse estudo comparativo teve como objetivo indicar o comportamento dos erros de controle, levando em conta a dureza e coeficiente de atrito medido para cada conjunto do tribosistema; e levando em conta amostras com variações de durezas ao longo do seu volume (heterogeneidade das amostras). Neste caso, os ensaios foram planejados da seguinte forma:

- Amostras: quinze amostras de materiais de atrito;
- Ensaios: Ensaio de dureza Gogan e Ensaio Krauss;
- Métodos: ABNT NBR5520 e ECER90;
- Máquinas: Durômetro modelo 911, e Dinamômetro inercial tipo A.

Tal comparativo vai se basear em três partes: medição das durezas das amostras, medição do coeficiente de atrito em dinamômetro e, por fim, análise dos materiais e seus controles PID respectivamente. No esquema da Figura 22 são indicados o que foi realizado em cada parte do comparativo realizado.

Figura 22 – Fluxograma detalhando as caracterizações realizadas para comparação dos materiais de atrito.



Fonte: (O autor)

### 3.4.1 Medições de dureza

Para determinação da dureza foi utilizado o durômetro código 911 (vide Figura 23) do laboratório de caracterização de materiais da FRAS-LE S.A. Para medição dos valores de dureza seguiu-se os procedimentos recomendados pela norma ABNT NBR5520.

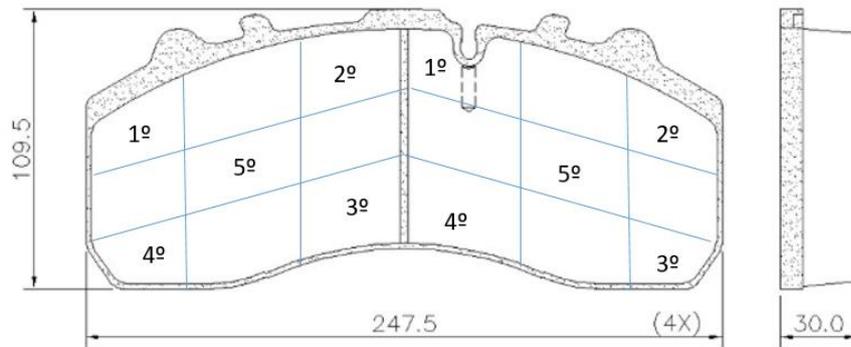
As peças cujas durezas medidas foram separadas em dois grupos distintos: grupo 1 e grupo 2. Para o grupo 1 foi escolhida de forma aleatória quatro peças do lote, e feita medições de dureza em cinco pontos distintos de cada lado da pastilha, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 24. Nas amostras do grupo 2, as leituras de dureza foram realizadas em vinte e cinco diferentes peças do leito, sendo as durezas medidas em ambos os lados das pastilhas, conforme os pontos indicados na Figura 25. A escolha dos cinco pontos de medição do grupo 1 foi pensada para uma posterior utilização em estudos aprofundados na localização dos pontos de durezas das peças e possíveis comparativos com mensurando dos ensaios.

Figura 23 – Durômetro empregado nas medidas de dureza.



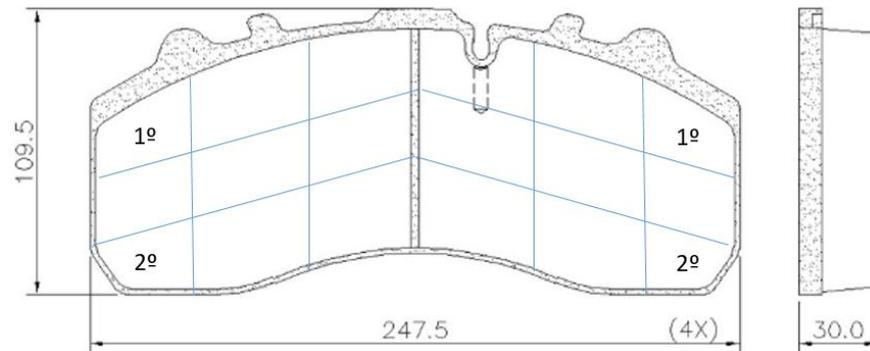
Fonte: (O autor)

Figura 24 – Esquema indicando a posição de leitura da dureza nas pastilhas de freio do grupo 1.



Fonte: (O autor)

Figura 25 – Esquema indicando a posição de leitura da dureza nas pastilhas de freio do grupo 2.



Fonte: (O autor)

Com os resultados das medidas de dureza realizadas, foi possível identificar quais amostras tem valores mais baixos e mais altos de dureza e as partes que os valores de durezas diferem daqueles medidos no restante do seu volume (heterogeneidades de uma amostra). Com esta análise foram escolhidos os pares tribológicos que foram utilizados para execução dos ensaios dinâmicos, explicados na sequência no tópico 3.4.2.

Para organizar as informações levantadas a partir destas medições, os valores medidos foram compilados separadamente para cada ponto de leitura e cada conjunto de amostras em uma planilha do Excel®, conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de aferição dos resultados FRAS-LE.





Fonte: (O autor)

Na Tabela 6 é mostrado o planejamento adotado na execução dos ensaios de atrito, sendo indicado a nomenclatura adotada para designar o ensaio, a amostra ensaiada e os requisitos de execução da caracterização.

Tabela 6 – Planejamento adotado na execução dos ensaios de atrito.

| Numeração do ensaio | Nomenclatura da amostra | Requisitos   |
|---------------------|-------------------------|--|
| Ensaio 1            | XA                      | Amostra interna e externa com maior gradiente central possível (entre mesma amostra) |
| Ensaio 2            | A1                      | Maior diferença de dureza entre lados A e B (entre mesma amostra)                    |
| Ensaio 3            | PA1                     | Maior diferença de dureza entre lados A e B (amostras diferentes)                    |
| Ensaio 4            | PB1                     | Menor diferença de durezas entre lados A e B (amostras diferentes)                   |
| Ensaio 5            | B2                      | Segunda menor diferença de dureza entre lados A e B (Mesma amostra)                  |
| Ensaio 6            | B1                      | Menor diferença entre lados A e B (Mesmas amostras)                                  |
| Ensaio 7            | M1                      | Amostras que tenham diferença média entre lado A e B (Mesmas amostras)               |
| Ensaio 8            | M2                      | Diferença média entre lado A e B (Mesmas amostras)                                   |
| Ensaio 9            | XB                      | Lado A e B com menor gradiente central possível(entre mesma amostra)                 |
| Ensaio 10           | A2                      | Segunda maior diferença de dureza entre lados A e B (entre mesma amostra)            |
| Ensaio 11           | PM1                     | Diferença média entre lado A e B (Amostras diferentes)                               |

Fonte: (O autor)

É importante ressaltar que nesse estudo em especial o resultado que foi avaliado detalhadamente constitui a dinâmica e o comportamento do controle PID, sendo o resultado das leituras de coeficiente de atrito um dado secundário resultante deste comparativo. Desta forma, foram fixados todas as características relacionadas ao sistema de freio que de alguma forma pudessem comprometer o resultado das análises posteriores. Dessa forma, foram fixados:

- Caliper;
- Disco de freio utilizados com superfície de mesma rugosidade;
- *Run-out* do disco de freio com até 0,03 mm; e,
- Parâmetros PID fixados do primeiro ao último ensaio.

### 3.4.3 Comparativo de controle PID

Para esse comparativo deve ser utilizado a ferramenta de quantificação de ensaio citada no item 3.3. A utilização desse modelo matemático vai produzir os resultados de sobressinal do regime transitório, e também o percentil de erro no regime permanente de todos ensaios executados no dinamômetro. Levando em conta que foram fixadas as características relacionadas ao sistema de freio, e os parâmetros relacionados aos índices de proporcional, integral e derivativo do controle; sendo a única variável flexível a dureza das amostras ensaiada. Esse procedimento foi adotado de modo a quantificar (números e percentis) o efeito da variação da dureza das amostras dos lotes sobre a dinâmica do ensaio de atrito.

### 3.5 COMPARATIVO DE POSICIONAMENTO DO DISCO DE FREIO

O presente estudo foi planejado com objetivo de analisar o ponto levantado no diagrama Ishikawa que se refere aos materiais empregados. Assim, foram utilizados discos com características de superfície dentro das normativas. Neste caso, os ensaios foram planejados da seguinte forma:

- Amostras: pastilha de referência;
- Freio: freio hidráulico a disco;
- Ensaio: ensaio dinâmico;
- Normas: ECER 90;
- Máquina: dinamômetro tipo A; e,
- Instrumento de medição: relógio comparador.

Esse ensaio foi planejado com intuito de verificar o comportamento do controle PID conforme a mudança no alinhamento mecânico no sistema de freio. Para tanto, foram executados dois ensaios em sequência, utilizando materiais de atrito de mesma referência, parâmetros de PID com exatamente o mesmo índice de proporcionalidade, derivativo e integrativo; e também os mesmos componentes de dinamômetro, porém introduzindo um desalinhamento da superfície (*run-out*) diferente. Para melhor entendimento do leitor, o *run-out* pode acontecer devido a dois motivos: erro de montagem do sistema, ou desalinhamento devido ao desgaste heterogêneo da superfície do disco. Na Figura 27 é indicado esquematicamente o desalinhamento de montagem.

Figura 27 – Ilustração indicando o desalinhamento na montagem do disco de freio, medido em relação a pastilha.



Fonte: (<https://www.hardwickmotors.co.uk/other-services/brake-disc-skimming/>-adaptado)

Nesse estudo comparativo foram adotadas as três primeiras etapas do método Krauss-ECER 90, adotando um disco novo e alinhamento perfeito (de cerca de 0,02 mm). Após finalização do ensaio, este foi repetido adotando as três primeiras etapas do método Krauss ECER 90, porém introduzindo desalinhamento forçado (de cerca de 0,1 mm). Em ambos os casos o desalinhamento foi medido com relógio comparador, como ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Fotografia mostrando o *setup* experimental empregado na determinação do desalinhamento do disco em relação às pastilhas de freio.



Fonte: (O autor)

### 3.6 ESTUDOS DE CASO

Durante o período de seis meses foi mapeado todo e qualquer tipo de problema ou mudanças ocorridas nos controles PID de todos dinamômetros do laboratório de P&D da FRAS-LE SA. Assim, um estudo de caso foi planejado para acompanhar os dados levantados em ensaios de rotina realizados no laboratório, visando testar e ajustar as soluções propostas, e mapear causas de problemas sem precisar planejar um teste comparativo conforme nos capítulos 3.4 e 3.5.

Para tanto foi feito um alinhamento com a equipe de manutenção, de modo que todos os chamados envolvendo o controle PID ou servoválvula de dinamômetros, fossem repassados e alinhados para uma análise profunda do autor do presente trabalho de conclusão de curso, podendo assim mapear, quantificar e confirmar algumas das hipóteses citadas no diagrama de Ishikawa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das diferentes análises realizadas, as quais foram descritas anteriormente na seção 3.

### 4.1 MODELO MATEMÁTICO DE PERCENTIL DE ERRO NOS REGIMES DO SISTEMA

No tópico 3.3 foi mostrado descrição da necessidade de criação de dois modelos matemáticos que pudessem realizar a quantificação de erro no regime permanente e transitório do controle PID das servoválvulas dos dinamômetros. Essa necessidade então foi dividida em dois casos diferentes. O primeiro caso foi criado com intuito de ajudar as equipes de operadores de dinamômetros, mecânicos de manutenção e de calibração a quantificar erros para melhorar o processo de verificação de controle do laboratório durante um ensaio. O segundo foi criado pela necessidade de um modelo que quantificasse de um modo geral os erros nos ensaios após sua finalização, podendo assim ajudar no processo de avaliação de ensaios pelos analistas e engenheiros de teste do laboratório. Neste tópico serão descritos os modelos gerados para atender a estas duas necessidades.

#### 4.1.1 Modelo matemático para análise durante ensaio

Essa ferramenta foi criada levando em conta a necessidade de estar em conjunto com a utilização do software do dinamômetro. Dessa forma, foi proposta em sua plataforma, previamente detalhada no item 3.2.2.1, por meio de fórmulas e conceitos, uma metodologia para quantificação do sobressinal e do erro em regime permanente de forma direta e automática, durante o uso de cada aplicação do freio. Para a criação dessa variável foi necessário o entendimento de cada parâmetro de referência que consta no manual de operação do dinamômetro, as quais são parcialmente exemplificadas na Tabela 7. Se tomar como referência os problemas de regime transitório e permanente que foram ilustrados anteriormente na Figura 20, pode-se verificar em qual momento de evolução da curva da pressão ou torque em função do tempo, o modelo matemático é usado para transformar as variáveis de referência para a fórmula de estimativa dos erros. Para o *overshoot* foi primeiramente identificado a variável de pressão ou torque máximo e médio, afim de conseguir apontar qual o ' $M_p$ ' resultante apenas adotando a fórmula matemática indicada na Tabela 8. Através da lista de referências foram

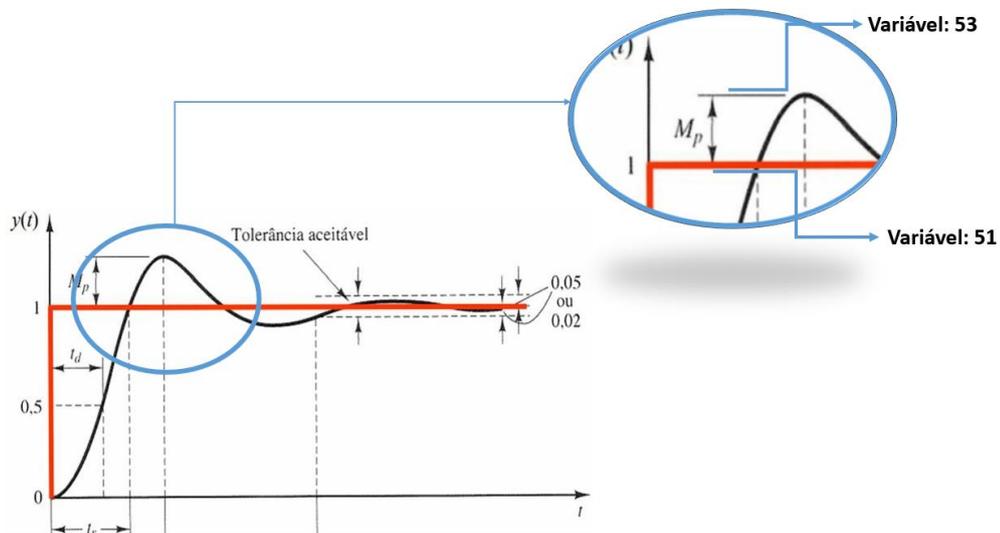
mapeadas as duas variáveis citadas: variável 53 (ponto máximo) e variável 51 (ponto médio). Esse processo é melhor entendido analisando a Figura 29.

Tabela 7 – Variáveis de referência para o controle do dinamômetro inercial.

| Vari | Unit      | Desc      | Summarized data |                                      |
|------|-----------|-----------|-----------------|--------------------------------------|
|      |           |           | Chnl            | Long description                     |
| 1    | unitless  | EvtDTC    | None            | Event date/time code                 |
| 2    | unitless  | EvtRec    | None            | Record number of event               |
| 3    | text      | EvtDate   | None            | Event date                           |
| 4    | text      | EvtTOD    | None            | Event time of day                    |
| 5    | unitless  | MachID    | None            | Source Machine ID                    |
| 6    | mile      | TotDst    | None            | Distance since start of test         |
| 7    | unitless  | Rev2Stp   | None            | Revolutions to stop                  |
| 8    | feet      | Dst2Stp   | None            | Distance to stop                     |
| 9    | unitless  | EvtNum    | None            | Event number                         |
| 10   | unitless  | SectID    | None            | Section identifier                   |
| 11   | rpm       | BrkSpd(r) | None            | Braking speed (rotational)           |
| 12   | rpm       | RelSpd(r) | None            | Release speed (rotational)           |
| 13   | mph       | BrkSpd(l) | None            | Braking speed (linear)               |
| 14   | mph       | RelSpd(l) | None            | Release speed (linear)               |
| 15   | unitless  | RawFlgs   | None            | Raw data flags                       |
| 16   | sec       | EvtTim    | None            | Event elapsed time                   |
| 17   | sec       | CycTime   | None            | Cycle time                           |
| 18   | sec       | IniDel    | None            | Initial delay                        |
| 19   | sec       | FinDel    | None            | Final delay                          |
| 20   | samps/sec | FRate     | None            | Fast sample rate                     |
| 21   | samps/sec | SRate     | None            | Slow sample rate                     |
| 23   | unitless  | DlogVer   | None            | DynoLogger.DLL version               |
| 24   | unitless  | SptVer    | None            | System SPT version                   |
| 25   | unitless  | RawRec    | None            | Raw data recorded (1=yes)            |
| 26   | unitless  | SpecRec   | None            | Spectral sound data recorded (1=any) |
| 27   | unitless  | AuxRec    | None            | Aux data recorded (1=yes)            |
| 28   | unitless  | VidRec    | Select          | Video recorded (1=yes)               |
| 29   | samps/sec | SumRate   | None            | Summary data sample rate             |
| 30   | unitless  | LastChn   | None            | Last physical analog channel         |
| 31   | unitless  | EvtFlgs   | None            | Event status flags (text or numeric) |
| 32   | unitless  | MiscFlgs  | None            | Miscellaneous status flags           |
| 33   | mph       | ClSpdA    | None            | Cooling air speed A end              |
| 34   | mph       | ClSpdB    | None            | Cooling air speed B end              |
| 35   | °F        | ClTmpA    | None            | Cooling air temp A end               |
| 36   | °F        | ClTmpB    | None            | Cooling air temp B end               |

Fonte: (O autor).

Figura 29 – Procedimento empregado para controlar a variação nos valores das variáveis de controle dos ensaios.

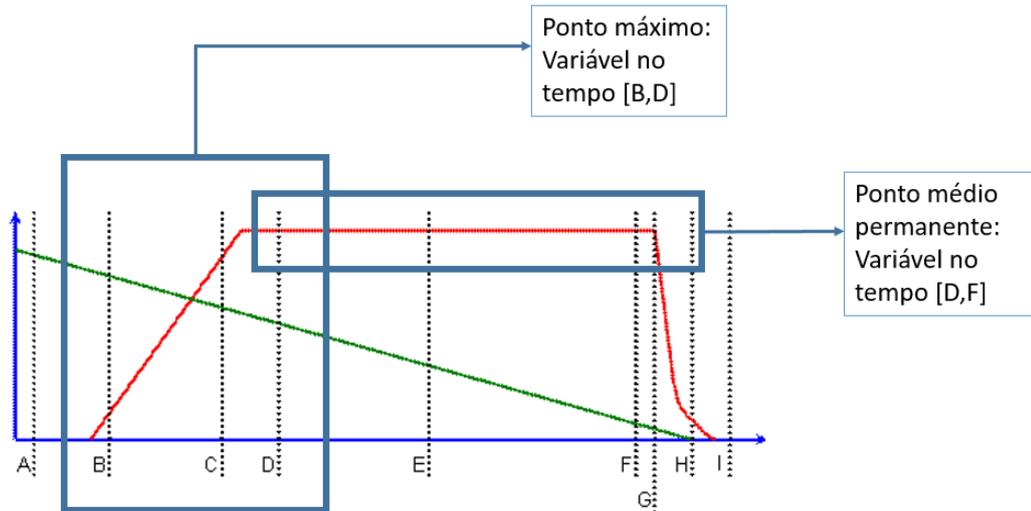


Fonte: (O autor).

Para variável tempo de processamento de dados na frenagem, foi escolhido o tempo entre B e D de apontamento de ponto máximo, e entre D e F para a média conforme mostra a Figura 30, conseguindo mensurar o  $M_p$  através da Eq. (3).

$$M_p = \text{Variavel } 53(B, D) - \text{Variavel } 51(D, F) \quad (3)$$

Figura 30 – Indicação da metodologia adotada para controle do tempo de processamento dos dados de frenagem.



Fonte: (O autor).

Para introduzir essa fórmula no programa RevData PLUS é necessário apontar em qual canal é aferido os valores da pressão e torque, respectivamente. Desta forma, foram analisados e identificados os canais de pressão como 103, e torque como 101. Um resumo dos canais, variáveis e fórmulas é indicado na Tabela 8.

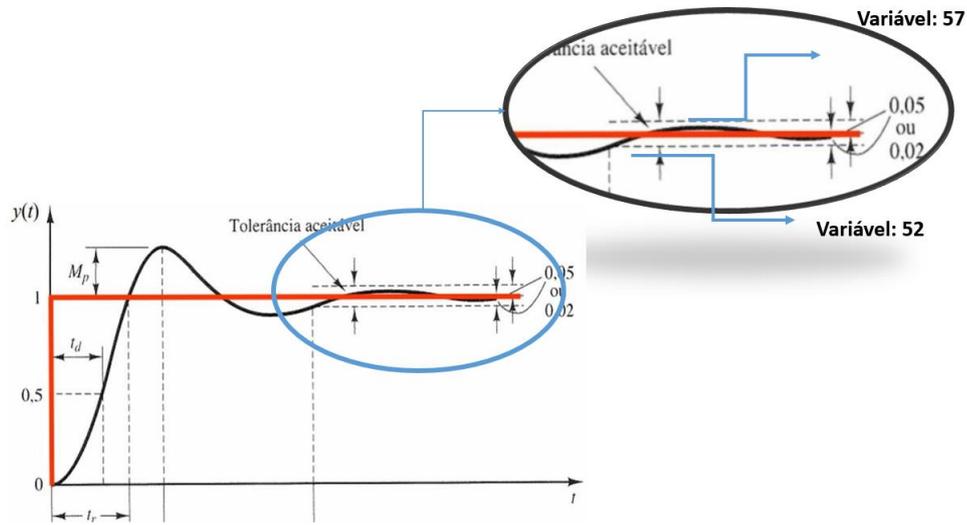
Tabela 8 – Indicação da fórmula empregada para controle das leitura pelo Software Revdata+®.

| Máximo | Médio | Fórmula   | Canal Pressão | Canal Torque |
|--------|-------|---|---------------|--------------|
| 53     | 51    | $M_p = \text{Variavel } 53(B, D) - \text{Variavel } 51(D, F)$ | 103           | 101          |

Fonte: (O autor).

Para aferir o delta de erro no regime permanente deve-se pegar duas variáveis de referência, a saber: o valor máximo e o valor mínimo entre os pontos de tempo D e F da Figura 18, e com isso colocar as duas em uma equação matemática para implementação. Pode-se entender melhor a escolha das variáveis observando a Figura 31. O resumo com os canais, variáveis e fórmulas matemáticas utilizadas para obtenção do erro no regime permanente são apresentadas na Tabela 9.

Figura 31 – Indicação da metodologia adotada para controle das variáveis de ensaio.



Fonte: (O autor).

Tabela 9 – Indicação da fórmula empregada para medida do erro de leitura pelo Software Revdata+®.

| Máximo | Mínimo | Fórmula  | Canal Pressão | Canal Torque |
|--------|--------|--|---------------|--------------|
| 57     | 52     | $Erro\ Permanente = Variavel\ 57(D,F) - Variavel\ 52(D,F)$ | 103           | 101          |

Fonte: (O autor).

Após obtenção de todas as variáveis e fórmulas para implementação do modelo, é importante transformar a equação simples mostrada acima em modelo de equação do software, e normalizar em porcentagem os valores para poder ter maior padrão e melhor visualização independentemente dos níveis de pressão e torque mensurados. Assim, as duas equações no software são representadas por:

- Permanente:  $((Data(vari:= 57, chn:= \%c, unt:= "\%u") - Data(vari:= 52, chn:= \%c, unt:= "\%u"))*100)/Data(vari:= 57, chn:= \%c, unt:= "\%u")$
- Sobressinal:  $((Data(vari:= 53, chn:= \%c, unt:= "\%u") - Data(vari:= 51, chn:= \%c, unt:= "\%u"))*100)/(Data(vari:= 53, chn:= \%c, unt:= "\%u"))$

Por fim, pode-se observar na Tabela 10 o layout pronto da planilha a ser usada pelos técnicos e operadores, indicando o percentil de quantificação tanto para erros no regime permanente quanto para erros no regime transitório, conforme objetivo da ferramenta.

Tabela 10 – Planilha indicando os dados de saída dos ensaios.



-1.701 events from test "Ca021822"

| Chrono    | SectCmt      | TmStp    | Permanente pressao (%) | Overshoot Pressao (%) | Permanente Torque (%) | Overshoot Torque (%) | CycTime | BrkSpd(l) | RelSpd(l) | AvgTime  | DecelTrq         | StpNum   |
|-----------|--------------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------|-----------|-----------|----------|------------------|----------|
|           |              |          | Record Pressure        | Record Pressure       | Torque                | Torque               |         |           |           | AirPress |                  |          |
| Sect:Recd |              |          | psi                    | psi                   | N-m                   | N-m                  | sec     | kph       | kph       | bar      | m/s <sup>2</sup> | unitless |
| 0100:0001 | Assentamento | 17:16:12 | 6.0                    | 2.1                   | 25.9                  | 11.3                 | 415     | 73.1      | 73.2      | 19.6     | 1.19             | 1        |
| 0100:0002 | Assentamento | 17:16:41 | 5.1                    | 2.2                   | 18.4                  | 8.9                  | 29      | 73.2      | 73.1      | 19.6     | 1.29             | 2        |
| 0100:0003 | Assentamento | 17:18:25 | 6.0                    | 2.3                   | 17.8                  | 8.1                  | 104     | 73.3      | 73.0      | 19.6     | 1.30             | 3        |
| 0100:0004 | Assentamento | 17:20:13 | 6.3                    | 2.4                   | 17.7                  | 8.1                  | 108     | 73.2      | 73.0      | 19.6     | 1.30             | 4        |
| 0100:0005 | Assentamento | 17:22:01 | 6.4                    | 2.7                   | 17.1                  | 8.1                  | 109     | 73.2      | 73.2      | 19.6     | 1.30             | 5        |
| 0100:0006 | Assentamento | 17:23:51 | 6.1                    | 2.3                   | 16.2                  | 7.4                  | 109     | 73.3      | 73.0      | 19.6     | 1.30             | 6        |
| 0100:0007 | Assentamento | 17:25:41 | 6.0                    | 2.4                   | 15.9                  | 7.3                  | 110     | 73.2      | 73.1      | 19.6     | 1.30             | 7        |
| 0100:0008 | Assentamento | 17:27:31 | 6.0                    | 2.4                   | 15.4                  | 7.0                  | 110     | 73.2      | 73.1      | 19.6     | 1.30             | 8        |
| 0100:0009 | Assentamento | 17:29:22 | 6.2                    | 2.5                   | 15.4                  | 7.1                  | 111     | 73.2      | 73.1      | 19.6     | 1.30             | 9        |
| 0100:0010 | Assentamento | 17:31:13 | 5.9                    | 2.5                   | 14.1                  | 6.2                  | 111     | 73.2      | 73.0      | 19.6     | 1.29             | 10       |
| 0100:0011 | Assentamento | 17:33:03 | 6.3                    | 2.5                   | 14.3                  | 5.9                  | 110     | 73.2      | 73.0      | 19.6     | 1.29             | 11       |
| 0100:0012 | Assentamento | 17:34:53 | 6.3                    | 2.4                   | 15.9                  | 6.9                  | 111     | 73.1      | 73.1      | 19.6     | 1.31             | 12       |
| 0100:0013 | Assentamento | 17:36:44 | 6.2                    | 2.4                   | 15.5                  | 6.8                  | 111     | 73.2      | 73.0      | 19.6     | 1.31             | 13       |
| 0100:0014 | Assentamento | 17:38:35 | 6.5                    | 3.2                   | 14.9                  | 6.8                  | 111     | 73.1      | 73.0      | 19.6     | 1.31             | 14       |
| 0100:0015 | Assentamento | 17:40:27 | 6.1                    | 2.4                   | 14.6                  | 7.0                  | 112     | 73.1      | 73.0      | 19.6     | 1.30             | 15       |
| 0100:0016 | Assentamento | 17:42:18 | 6.3                    | 3.0                   | 14.9                  | 7.0                  | 112     | 73.2      | 73.1      | 19.6     | 1.31             | 16       |
| 0100:0017 | Assentamento | 17:44:10 | 5.8                    | 2.4                   | 15.0                  | 7.0                  | 112     | 73.2      | 73.1      | 19.6     | 1.31             | 17       |
| 0100:0018 | Assentamento | 17:46:02 | 5.9                    | 2.4                   | 15.6                  | 7.2                  | 112     | 73.2      | 73.0      | 19.6     | 1.32             | 18       |
| 0100:0019 | Assentamento | 17:47:54 | 6.3                    | 3.1                   | 14.7                  | 7.1                  | 112     | 73.2      | 73.0      | 19.6     | 1.33             | 19       |
| 0100:0020 | Assentamento | 17:49:48 | 6.6                    | 3.1                   | 15.1                  | 6.9                  | 114     | 73.2      | 73.0      | 19.6     | 1.33             | 20       |
| 0100:0021 | Assentamento | 17:51:41 | 5.6                    | 2.7                   | 13.4                  | 6.6                  | 113     | 73.1      | 73.1      | 19.6     | 1.32             | 21       |

Fonte: (O autor).

#### 4.1.2 Modelo matemático para análise pós ensaio

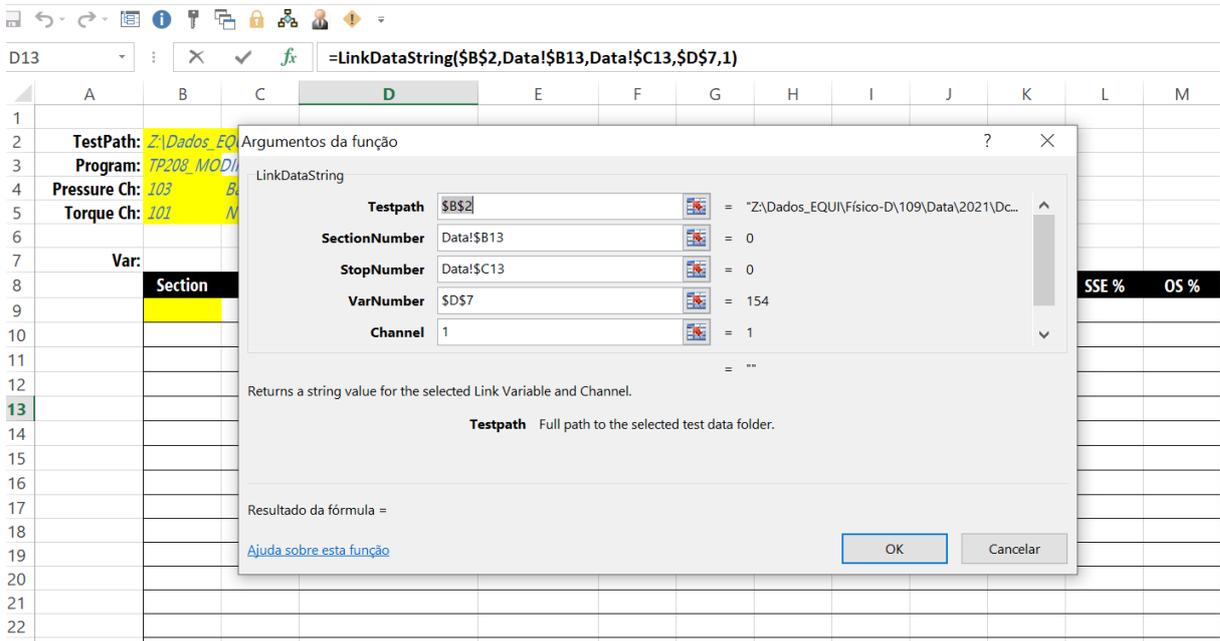
Essa ferramenta foi criada levando em conta a necessidade de um modelo matemático para análise de controle PID por engenheiros e analistas de testes, em um período de pós teste. Ao contrário do primeiro modelo, não se vê a necessidade dessa ferramenta trazer mensurados através de visualizações no software original. Dessa forma, foi criada em planilha do Excel®, utilizando fórmulas e conceitos específicos, um método de quantificação do sobressinal e do erro em regime permanente utilizando as informações de todos ensaios. Nesta planilha, os dados podem ser visualizados por informações relativas à frenagem, por médias de seção e por médias do ensaio como um todo, podendo aferir com clareza o quanto o ensaio está sendo prejudicado ou não por erros de controle.

O modelo matemático foi elaborado utilizando um suplemento de Excel® da LINK (fabricante do dinamômetro) usado afim de facilitar as importações de dados de ensaio para uma planilha de Excel®, para posteriormente transformá-las em fórmulas matemáticas aferindo erros de regime tanto no regime permanente quanto no transitório. Para elaboração deste modelo matemático no Excel® foi importante o entendimento das variáveis do sistema e canais de sensores utilizadas no tópico 4.1.1, e o entendimento das equações provenientes do suplemento da LINK.

A equação do suplemento utilizado para importação dos dados do ensaio para o Excel® foi a *LinkDataString*. Essa equação possibilita a importação de qualquer dado do ensaio, apenas informando a pasta onde este se encontra, e as variáveis e canais que deseja observar na análise. A organização de variáveis necessárias pode ser observada na Tabela 11, e seguem a lógica descrita abaixo:

- *Test path*: caminho da pasta onde está inserido os ensaios;
- *Section number*: seção que deseja extrair os dados;
- *Stop number*: número da frenagem que deseja extrair os dados;
- *Var Number*: variável de tempo do ensaio que deseja extrair;
- *Canal*: canal que está instalado o sensor do mensurando desejado.

Tabela 11 – Funções e variáveis para programação do modelo.



Fonte: (O autor).

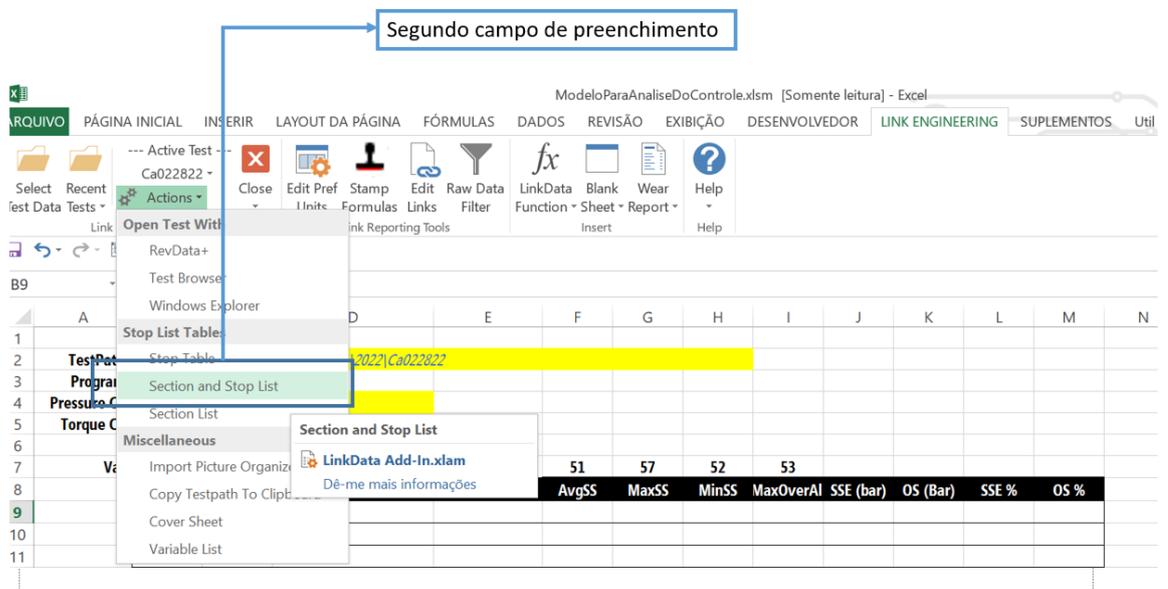
Com a utilização desta função, e com interligações de células e equações do Excel®, para extração dos dados básicos é necessário apenas o preenchimento de dois campos, que os demais campos do modelo criado se preenchem automaticamente. Os campos para preenchimento juntamente com os mensurados apontados, podem ser observado nas Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12 – Caminho e cabeçalho do modelo matemático.

The image shows an Excel spreadsheet with a table. The table has columns: Section, Stop, Section Name, ServoMode, AvgSS, MaxSS, MinSS, MaxOverAl, SSE (bar), OS (Bar), SSE %, and OS %. The table is highlighted in yellow. Above the table, there are labels: TestPath, Program, Pressure Ch, and Torque Ch. The TestPath label points to a cell containing the path: Z:\Dados\_EQUI\Físico-D\109\Data\2021\Dc040221. The Program label points to a cell containing: TP208\_MODIF\CAD\O.SP1. The Pressure Ch label points to a cell containing: 103 Bar. The Torque Ch label points to a cell containing: 101 N\*m. Arrows point to the TestPath and Program fields, labeled 'Caminho para inserção de ensaio' and 'Cabeçalho com variáveis solicitadas' respectively.

Fonte: (O autor).

Tabela 13 – Tabela com segundo campo de preenchimento do modelo.



Fonte: (O autor).

As equações utilizadas para transformar os dados em apontamentos de sobressinal e erros no regime permanente seguem a Tabela 8 e Tabela 9, apresentadas anteriormente no item 4.1.1. Para melhor visualização e uma eficácia maior da ferramenta, foram compilados os dados principais em uma planilha dinâmica (Tabela 14), podendo escolher entre qual controle será adotado para verificar o comportamento e as médias de cada seção apontada do ensaio.

Tabela 14 – Tabela de visualização de resultados de erros.

| ServoMode          | Pressure                                      |                     |                   |                |               |
|--------------------|---|---------------------|-------------------|----------------|---------------|
| Section            | Section Name                                  | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % |
| 1                  |   | 0.54                | 0.26              | 4.91%          | 2.21%         |
| 2                  | Friction cycle No. 1                          | 0.55                | 0.17              | 4.67%          | 1.43%         |
| 3                  | Friction cycle No. 2                          | 0.58                | 0.31              | 4.93%          | 2.63%         |
| 4                  | Friction cycle No. 3                          | 0.59                | 0.31              | 5.08%          | 2.63%         |
| 5                  | Friction cycle No. 4                          | 0.60                | 0.18              | 5.18%          | 1.51%         |
| 6                  | Friction cycle No. 5                          | 0.57                | 0.19              | 4.85%          | 1.59%         |
| 7                  | Friction cycle No. 6                          | 0.61                | 0.19              | 5.22%          | 1.65%         |
| 8                  | Friction cycle No. 7                          | 0.58                | 0.19              | 4.96%          | 1.63%         |
| 9                  | Friction cycle No. 8                          | 0.59                | 0.20              | 5.08%          | 1.69%         |
| 10                 | Friction cycle No. 9                          | 0.59                | 0.19              | 5.03%          | 1.65%         |
| 11                 | Friction cycle No. 10                         | 0.60                | 0.21              | 5.14%          | 1.76%         |
| 12                 | Friction cycle No. 11                         | 0.60                | 0.20              | 5.15%          | 1.75%         |
| 100                | Cooling                                       | 0.01                | 0.00              | 12.50%         | 0.00%         |
| 999                | Instrument check stops as first burnish cycle | 0.55                | 0.68              | 4.73%          | 5.85%         |
| <b>Total Geral</b> |   | <b>0.56</b>         | <b>0.25</b>       | <b>5.03%</b>   | <b>2.16%</b>  |

Fonte: (O autor).

Nesta seção foi descrita a forma com as leituras dos erros de controle da válvula PID são quantificados, e como é feita a visualização dos parâmetros de controle em cada etapa dos ensaios, mostrando como podem ser mensurar as médias absolutas e também o percentil de erro

das seções do teste, em âmbito geral. É importante ressaltar que tal ferramenta teve sua utilização validada perante um comparativo com a análise gráfica do erro, indicando a sua efetividade e a coerência nos resultados apresentados.

## 4.2 COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS DE ATRITO

### 4.2.1 Medições de dureza

Os resultados das medidas de durezas efetuadas nas pastilhas de freio dos grupos 1 (Figura 24) e 2 (Figura 25) são representados no APÊNDICE A – Resultados das medidas de dureza na escala Gogan. As leituras para o grupo 1 (A.1 Pastilhas de freio do Grupo 1.), cujos resultados estão compilados na Tabela 25, foram esquematizadas na Tabela 15 de acordo com a posição de leitura na peça, afim de possibilitar observação da heterogeneidade de valores em uma mesma pastilha. As amostras escolhidas para realização destas medidas foram as amostras de número 3, 9, 14 e 24.

Tabela 15 – Resultados das medidas de durezas por amostra do Grupo 1.

| Resultados Conforme a Posição Na Peça |    |    |        |    |    |     |     |
|---------------------------------------|----|----|--------|----|----|-----|-----|
| LADO A                                |    |    | LADO B |    |    | A   | B   |
| 31                                    |    | 26 | 30     |    | 28 | 0%  | 10% |
|                                       | 25 |    |        | 30 |    | 12% | 0%  |
| 31                                    |    | 27 | 32     |    | 27 | 10% | 0%  |
| 31                                    |    | 28 | 30     |    | 30 | 7%  | 3%  |
|                                       | 26 |    |        | 28 |    | 3%  | 7%  |
| 29                                    |    | 27 | 31     |    | 28 | 3%  | 0%  |
| 29                                    |    | 29 | 30     |    | 30 | 0%  | -3% |
|                                       | 29 |    |        | 28 |    | -2% | 0%  |
| 29                                    |    | 30 | 28     |    | 29 | -3% | 0%  |
| 28                                    |    | 27 | 29     |    | 30 | 0%  | -7% |
|                                       | 27 |    |        | 29 |    | -7% | 0%  |
| 28                                    |    | 29 | 30     |    | 30 | -7% | 0%  |

Fonte: (O autor)

Para as amostras do grupo 2, foram obtidos os resultados conforme esquema apresentado na Tabela 16. As leituras para o grupo 2 são apresentadas APÊNDICE A – Resultados das medidas de dureza na escala Gogan, A.2 Pastilhas de freio do Grupo 2., nas Tabela 26 e Tabela

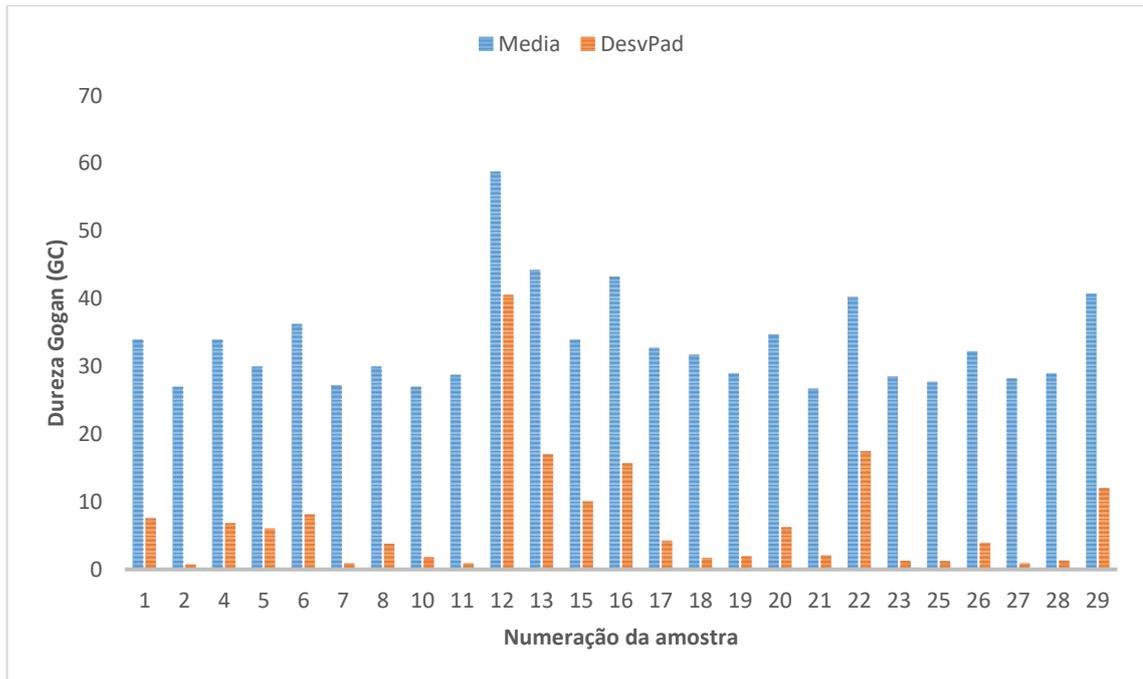
Tabela 16 – Resultados das medidas de durezas por amostra do Grupo 2.

| <table border="1"> <tr><td>26%</td></tr> <tr><td>-24%</td></tr> <tr><td>35%</td></tr> <tr><td>-6%</td></tr> <tr><td>44%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>1A</th><th>1B</th></tr> <tr><td>36</td><td>27</td></tr> <tr><td>40</td><td>28</td></tr> <tr><td>44</td><td>29</td></tr> </table>   | 26%  | -24% | 35%  | -6%  | 44%  | 1A | 1B | 36 | 27 | 40 | 28 | 44 | 29 | <table border="1"> <tr><td>11%</td></tr> <tr><td>-4%</td></tr> <tr><td>11%</td></tr> <tr><td>-4%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>10A</th><th>10B</th></tr> <tr><td>28</td><td>25</td></tr> <tr><td>29</td><td>26</td></tr> <tr><td>29</td><td>26</td></tr> </table>   | 11% | -4%  | 11% | -4%  | 10A  | 10B | 28  | 25   | 29   | 26  | 29  | 26  | <table border="1"> <tr><td>6%</td></tr> <tr><td>-6%</td></tr> <tr><td>8%</td></tr> <tr><td>-3%</td></tr> <tr><td>3%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>18A</th><th>18B</th></tr> <tr><td>32</td><td>30</td></tr> <tr><td>33</td><td>31</td></tr> <tr><td>34</td><td>31</td></tr> </table> | 6%   | -6% | 8%   | -3%  | 3%   | 18A  | 18B  | 32  | 30  | 33 | 31  | 34  | 31 | <table border="1"> <tr><td>6%</td></tr> <tr><td>-19%</td></tr> <tr><td>17%</td></tr> <tr><td>3%</td></tr> <tr><td>28%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>26A</th><th>26B</th></tr> <tr><td>32</td><td>30</td></tr> <tr><td>35</td><td>30</td></tr> <tr><td>38</td><td>29</td></tr> </table> | 6%   | -19% | 17%  | 3%  | 28% | 26A | 26B | 32  | 30 | 35 | 30 | 38 | 29 |    |
|--|------|------|------|------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|---|-----|------|-----|--|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|--|--|-----|------|------|--|------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|--|--|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 26%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -24%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 35%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -6%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 44%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 1A   | 1B   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 36   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 40   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 44   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 11%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 11%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 10A  | 10B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28   | 25   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 26   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 26   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 6%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -6%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 8%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -3%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 3%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 18A  | 18B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 32   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 33   | 31   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 34   | 31   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 6%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -19%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 17%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 3%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 26A  | 26B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 32   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 35   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 38   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| <table border="1"> <tr><td>4%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>-7%</td></tr> <tr><td>-4%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>2A</th><th>2B</th></tr> <tr><td>27</td><td>26</td></tr> <tr><td>27</td><td>27</td></tr> <tr><td>27</td><td>28</td></tr> </table>   | 4%   | 0%   | 0%   | -7%  | -4%  | 2A | 2B | 27 | 26 | 27 | 27 | 27 | 28 | <table border="1"> <tr><td>3%</td></tr> <tr><td>-3%</td></tr> <tr><td>5%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>7%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>11A</th><th>11B</th></tr> <tr><td>29</td><td>28</td></tr> <tr><td>30</td><td>28</td></tr> <tr><td>30</td><td>28</td></tr> </table>   | 3%  | -3%  | 5%  | 0%   | 7%   | 11A | 11B | 29   | 28   | 30  | 28  | 30  | 28   | <table border="1"> <tr><td>14%</td></tr> <tr><td>14%</td></tr> <tr><td>7%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>19A</th><th>19B</th></tr> <tr><td>32</td><td>28</td></tr> <tr><td>30</td><td>28</td></tr> <tr><td>28</td><td>28</td></tr> </table>                          | 14% | 14%  | 7%   | 0%   | 19A  | 19B  | 32  | 28  | 30 | 28  | 28  | 28 | <table border="1"> <tr><td>4%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>5%</td></tr> <tr><td>4%</td></tr> <tr><td>7%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>27A</th><th>27B</th></tr> <tr><td>29</td><td>28</td></tr> <tr><td>29</td><td>28</td></tr> <tr><td>29</td><td>27</td></tr> </table>     | 4%   | 0%   | 5%   | 4%  | 7%  | 27A | 27B | 29  | 28 | 29 | 28 | 29 | 27 |    |
| 4%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -7%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 2A   | 2B   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27   | 26   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 3%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -3%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 5%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 7%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 11A  | 11B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 14%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 14%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 7%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 19A  | 19B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 32   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 4%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 5%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 4%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 7%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27A  | 27B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| <table border="1"> <tr><td>12%</td></tr> <tr><td>-32%</td></tr> <tr><td>26%</td></tr> <tr><td>-3%</td></tr> <tr><td>41%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>4A</th><th>4B</th></tr> <tr><td>33</td><td>29</td></tr> <tr><td>39</td><td>30</td></tr> <tr><td>44</td><td>30</td></tr> </table>   | 12%  | -32% | 26%  | -3%  | 41%  | 4A | 4B | 33 | 29 | 39 | 30 | 44 | 30 | <table border="1"> <tr><td>49%</td></tr> <tr><td>-97%</td></tr> <tr><td>98%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>146%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>12A</th><th>12B</th></tr> <tr><td>59</td><td>30</td></tr> <tr><td>88</td><td>30</td></tr> <tr><td>116</td><td>30</td></tr> </table>   | 49% | -97% | 98% | 0%   | 146% | 12A | 12B | 59   | 30   | 88  | 30  | 116 | 30   | <table border="1"> <tr><td>20%</td></tr> <tr><td>-20%</td></tr> <tr><td>27%</td></tr> <tr><td>-6%</td></tr> <tr><td>35%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>20A</th><th>20B</th></tr> <tr><td>36</td><td>29</td></tr> <tr><td>40</td><td>30</td></tr> <tr><td>43</td><td>31</td></tr> </table> | 20% | -20% | 27%  | -6%  | 35%  | 20A  | 20B | 36  | 29 | 40  | 30  | 43 | 31   | <table border="1"> <tr><td>10%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>7%</td></tr> <tr><td>-7%</td></tr> <tr><td>3%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>28A</th><th>28B</th></tr> <tr><td>30</td><td>27</td></tr> <tr><td>30</td><td>28</td></tr> <tr><td>30</td><td>29</td></tr> </table>     | 10%  | 0%   | 7%  | -7% | 3%  | 28A | 28B | 30 | 27 | 30 | 28 | 30 | 29 |
| 12%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -32%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 26%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -3%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 41%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 4A   | 4B   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 33   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 39   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 44   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 49%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -97%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 98%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 146%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 12A  | 12B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 59   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 88   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 116  | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 20%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -20%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -6%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 35%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 20A  | 20B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 36   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 40   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 43   | 31   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 10%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 7%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -7%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 3%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28A  | 28B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| <table border="1"> <tr><td>-3%</td></tr> <tr><td>-43%</td></tr> <tr><td>17%</td></tr> <tr><td>-3%</td></tr> <tr><td>37%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>5A</th><th>5B</th></tr> <tr><td>26</td><td>27</td></tr> <tr><td>33</td><td>28</td></tr> <tr><td>39</td><td>28</td></tr> </table>   | -3%  | -43% | 17%  | -3%  | 37%  | 5A | 5B | 26 | 27 | 33 | 28 | 39 | 28 | <table border="1"> <tr><td>63%</td></tr> <tr><td>-5%</td></tr> <tr><td>67%</td></tr> <tr><td>2%</td></tr> <tr><td>70%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>13A</th><th>13B</th></tr> <tr><td>58</td><td>30</td></tr> <tr><td>59</td><td>30</td></tr> <tr><td>60</td><td>29</td></tr> </table>  | 63% | -5%  | 67% | 2%   | 70%  | 13A | 13B | 58   | 30   | 59  | 30  | 60  | 29   | <table border="1"> <tr><td>-7%</td></tr> <tr><td>7%</td></tr> <tr><td>-13%</td></tr> <tr><td>-4%</td></tr> <tr><td>-19%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>21A</th><th>21B</th></tr> <tr><td>26</td><td>28</td></tr> <tr><td>25</td><td>29</td></tr> <tr><td>24</td><td>29</td></tr> </table> | -7% | 7%   | -13% | -4%  | -19% | 21A  | 21B | 26  | 28 | 25  | 29  | 24 | 29   | <table border="1"> <tr><td>44%</td></tr> <tr><td>-15%</td></tr> <tr><td>50%</td></tr> <tr><td>-2%</td></tr> <tr><td>56%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>29A</th><th>29B</th></tr> <tr><td>48</td><td>30</td></tr> <tr><td>51</td><td>31</td></tr> <tr><td>54</td><td>31</td></tr> </table> | 44%  | -15% | 50% | -2% | 56% | 29A | 29B | 48 | 30 | 51 | 31 | 54 | 31 |
| -3%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -43%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 17%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -3%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 37%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 5A   | 5B   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 26   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 33   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 39   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 63%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -5%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 67%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 2%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 70%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 13A  | 13B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 58   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 59   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 60   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -7%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 7%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -13%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -19%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 21A  | 21B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 26   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 25   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 24   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 44%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -15%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 50%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -2%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 56%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29A  | 29B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 48   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 51   | 31   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 54   | 31   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| <table border="1"> <tr><td>30%</td></tr> <tr><td>-17%</td></tr> <tr><td>37%</td></tr> <tr><td>-3%</td></tr> <tr><td>44%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>6A</th><th>6B</th></tr> <tr><td>40</td><td>29</td></tr> <tr><td>43</td><td>30</td></tr> <tr><td>46</td><td>30</td></tr> </table>   | 30%  | -17% | 37%  | -3%  | 44%  | 6A | 6B | 40 | 29 | 43 | 30 | 46 | 30 | <table border="1"> <tr><td>26%</td></tr> <tr><td>-38%</td></tr> <tr><td>44%</td></tr> <tr><td>-3%</td></tr> <tr><td>62%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>15A</th><th>15B</th></tr> <tr><td>35</td><td>26</td></tr> <tr><td>42</td><td>27</td></tr> <tr><td>48</td><td>27</td></tr> </table>  | 26% | -38% | 44% | -3%  | 62%  | 15A | 15B | 35   | 26   | 42  | 27  | 48  | 27   | <table border="1"> <tr><td>40%</td></tr> <tr><td>-52%</td></tr> <tr><td>66%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>92%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>22A</th><th>22B</th></tr> <tr><td>43</td><td>27</td></tr> <tr><td>54</td><td>27</td></tr> <tr><td>64</td><td>27</td></tr> </table>  | 40% | -52% | 66%  | 0%   | 92%  | 22A  | 22B | 43  | 27 | 54  | 27  | 64 | 27   |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -17%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 37%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -3%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 44%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 6A   | 6B   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 40   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 43   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 46   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 26%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -38%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 44%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -3%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 62%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 15A  | 15B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 35   | 26   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 42   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 48   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 40%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -52%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 66%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 92%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 22A  | 22B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 43   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 54   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 64   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| <table border="1"> <tr><td>-4%</td></tr> <tr><td>-7%</td></tr> <tr><td>-2%</td></tr> <tr><td>-4%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>7A</th><th>7B</th></tr> <tr><td>26</td><td>27</td></tr> <tr><td>27</td><td>28</td></tr> <tr><td>28</td><td>28</td></tr> </table>   | -4%  | -7%  | -2%  | -4%  | 0%   | 7A | 7B | 26 | 27 | 27 | 28 | 28 | 28 | <table border="1"> <tr><td>51%</td></tr> <tr><td>-21%</td></tr> <tr><td>61%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>72%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>16A</th><th>16B</th></tr> <tr><td>52</td><td>27</td></tr> <tr><td>28</td><td>40</td></tr> <tr><td>28</td><td>30</td></tr> <tr><td>61</td><td>26</td></tr> <tr><td>34</td><td>30</td></tr> </table> | 51% | -21% | 61% | 0%   | 72%  | 16A | 16B | 52   | 27   | 28  | 40  | 28  | 30   | 61   | 26  | 34   | 30   | <table border="1"> <tr><td>-4%</td></tr> <tr><td>-11%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>-4%</td></tr> <tr><td>4%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>23A</th><th>23B</th></tr> <tr><td>27</td><td>28</td></tr> <tr><td>29</td><td>29</td></tr> <tr><td>30</td><td>29</td></tr> </table> | -4%  | -11% | 0%  | -4% | 4% | 23A | 23B | 27 | 28   | 29   | 29   | 30   | 29  |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -7%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -2%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 7A   | 7B   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 26   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 51%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -21%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 61%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 72%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 16A  | 16B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 52   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28   | 40   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 61   | 26   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 34   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -11%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 4%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 23A  | 23B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 29   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| <table border="1"> <tr><td>-13%</td></tr> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>-13%</td></tr> <tr><td>-13%</td></tr> <tr><td>-27%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>8A</th><th>8B</th></tr> <tr><td>27</td><td>30</td></tr> <tr><td>26</td><td>28</td></tr> <tr><td>27</td><td>31</td></tr> <tr><td>31</td><td>27</td></tr> <tr><td>24</td><td>35</td></tr> </table> | -13% | 0%   | -13% | -13% | -27% | 8A | 8B | 27 | 30 | 26 | 28 | 27 | 31 | 31  | 27  | 24   | 35  | <table border="1"> <tr><td>0%</td></tr> <tr><td>-6%</td></tr> <tr><td>11%</td></tr> <tr><td>-27%</td></tr> <tr><td>-21%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>17A</th><th>17B</th></tr> <tr><td>30</td><td>30</td></tr> <tr><td>31</td><td>35</td></tr> <tr><td>32</td><td>39</td></tr> </table> | 0%   | -6% | 11% | -27% | -21% | 17A | 17B | 30  | 30   | 31   | 35  | 32   | 39   | <table border="1"> <tr><td>7%</td></tr> <tr><td>-4%</td></tr> <tr><td>5%</td></tr> <tr><td>-7%</td></tr> <tr><td>4%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th>25A</th><th>25B</th></tr> <tr><td>28</td><td>26</td></tr> <tr><td>29</td><td>27</td></tr> <tr><td>29</td><td>28</td></tr> </table>   | 7%   | -4%  | 5%  | -7% | 4% | 25A | 25B | 28 | 26   | 29   | 27   | 29   | 28  |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -13%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -13%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -13%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -27%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 8A   | 8B   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 26   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 27   | 31   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 31   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 24   | 35   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 0%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -6%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 11%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -27%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -21%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 17A  | 17B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 30   | 30   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 31   | 35   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 32   | 39   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 7%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -4%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 5%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| -7%  |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 4%   |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 25A  | 25B  |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 28   | 26   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 27   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
| 29   | 28   |      |      |      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |      |     |  |      |     |     |      |      |     |     |     |  |  |     |      |      |  |      |      |     |     |    |     |     |    |  |  |      |      |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |

Fonte: (O autor)

Com base nos resultados apresentados nas Tabela 15 e Tabela 16 foi possível escolher as pastilhas para realização dos ensaios de atrito subsequentes, conforme roteiro anteriormente apresentado na Tabela 6. Através dos resultados das Tabela 15 e Tabela 16 foi possível analisar o desvio padrão, e assim elencar os dois extremos para os testes de atrito, referentes ao ensaio número 1 e 9 indicados na Tabela 6. Na Figura 32 é mostrado o desvio padrão das leituras de dureza realizadas nos lados A e B da amostra 12, a qual foi definida como XA (amostra interna e externa com maior gradiente central possível), da mesma forma como a amostra 2 foi definida como XB (lado A e B com menor gradiente central possível).

Figura 32 – Desvio padrão das leituras de dureza realizados entre os lados A e B da amostra 12.



Fonte: (O autor).

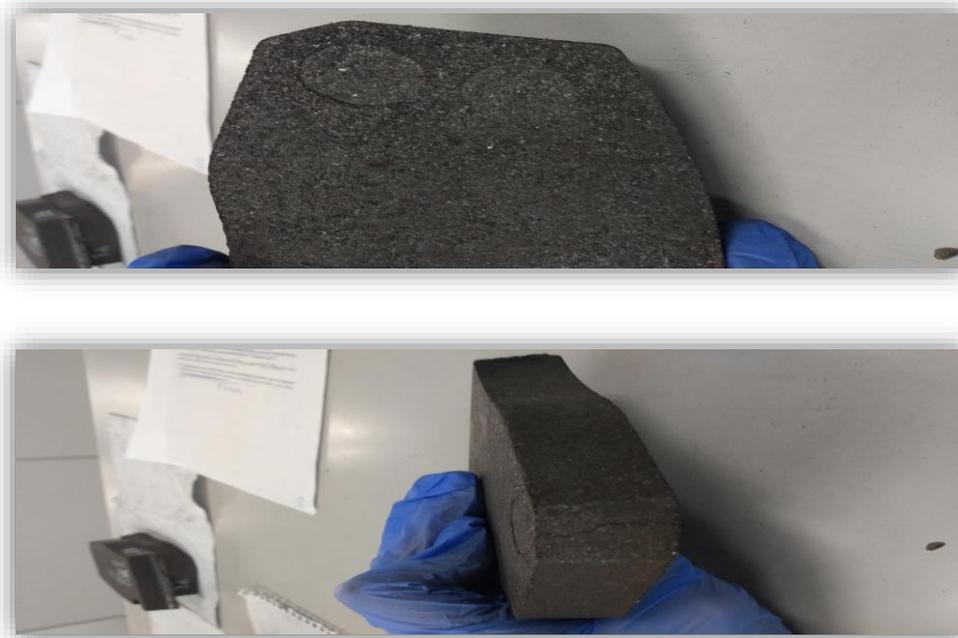
Para o restante dos ensaios foram feitos cálculos seguindo o roteiro de teste, e os valores organizados na Tabela 17. Durante as medições foram executadas algumas inspeções visuais sobre o material ensaiado, conforme indicado na Figura 33, de modo a identificar possíveis fissuras resultantes da penetração do indentador usado na realização das medidas de dureza.

Tabela 17 – Roteiro para escolha das amostras para ensaios em dinamômetro

| Numeração do ensaio | Nomenclatura da amostra | Amostra interna | Amostra externa | Dureza média interna (GC) | Dureza média externa (GC) |
|---------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| Ensaio 1            | XA                      | 12A             | 12B             | 88                        | 30                        |
| Ensaio 2            | A1                      | 16B             | 16A             | 30                        | 57                        |
| Ensaio 3            | PA1                     | 13A             | 18B             | 59                        | 31                        |
| Ensaio 4            | PB1                     | 1B              | 28B             | 28                        | 28                        |
| Ensaio 5            | B2                      | 7B              | 7A              | 28                        | 27                        |
| Ensaio 6            | B1                      | 3A              | 3B              | 29                        | 29                        |
| Ensaio 7            | M1                      | 8A              | 8B              | 27                        | 28                        |
| Ensaio 8            | M2                      | 26B             | 26A             | 30                        | 35                        |
| Ensaio 9            | XB                      | 2A              | 2B              | 27                        | 27                        |
| Ensaio 10           | A2                      | 22B             | 22A             | 27                        | 54                        |
| Ensaio 11           | PM1                     | 1A              | 18A             | 40                        | 33                        |

Fonte: (O autor)

Figura 33 – Indicação das análises visuais realizadas após ensaio de dureza.



Fonte: (O autor).

#### 4.2.2 Medições de atrito e comparativo PID

Para avaliar o comportamento do controle PID durante utilização do dinamômetro nos ensaios de atrito, foram feitos onze (11) ensaios conforme recomendação da norma ECER90, possibilitando a análise do desempenho e seu comparativo com os valores de durezas apresentadas anteriormente na seção 4.2.1. O ensaio segundo a norma citada, tem como resultado primário o coeficiente de atrito do par tribológico (disco e pastilha de freio). Entretanto, tendo em vista o escopo deste trabalho, foram apresentados os percentis de erro das leituras de coeficiente de atrito em sistemas de freios.

Para quantificar o comportamento dos percentis de erro das leituras do coeficiente de atrito, foi utilizada a ferramenta de cálculo explicada na seção 4.1.2, e os resultados retirados diretamente das tabelas dinâmicas geradas, representadas nas Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20.

De acordo com a análise das Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20, pode-se verificar que mesmo fixando os parâmetros de influência vinculadas ao equipamento e ao freio, obteve-se uma faixa de variação grande em *overshoot* (OS), e de erro em regime permanente (SSE). Ao avaliar o comportamento de erro do sistema PID no regime transitório, é possível observar um conjunto de variação de 0,18 bar para o par tribológico com menor erro; e 2,05 bar para as pastilhas com maior erro. Essa variação é considerada grande quando comparada ao erro em regime permanente que tem variação mínima e máxima de 0,35 e 0,78 bar, respectivamente.

Levando em conta que a norma previamente mencionada cita uma aplicação de 11,7 bar para cada frenagem realizada durante o ensaio, e o percentil médio de erro no regime permanente foi na casa de 4%, observa-se que a maioria dos resultados dos ensaios ficaram dentro da tolerância aceitável para o método. Porém, ao observar a média de sobressinal representado no ensaio 10, é possível afirmar que este fugiu do parâmetro considerado aceitável pela norma, tendo um percentil de erro de 17,52% quando associado com a aplicação solicitada.

Tabela 18 – Comparativo PID entre os ensaios 1 a 4.

| Ensaio 1           |                       |                     |                   |                |               | Ensaio 2           |                       |                     |                   |                |               |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------|
| Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % | Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % |
| 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.77                | 0.35              | 6.54%          | 3.03%         | 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.77                | 0.35              | 6.54%          | 3.03%         |
| 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.59                | 0.29              | 5.05%          | 2.44%         | 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.59                | 0.29              | 5.05%          | 2.44%         |
| 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.59                | 0.30              | 5.05%          | 2.56%         | 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.59                | 0.30              | 5.05%          | 2.56%         |
| 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.48                | 0.25              | 4.09%          | 2.11%         | 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.48                | 0.25              | 4.09%          | 2.11%         |
| 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.54                | 0.28              | 4.64%          | 2.39%         | 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.54                | 0.28              | 4.64%          | 2.39%         |
| 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.69                | 0.35              | 5.88%          | 2.96%         | 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.69                | 0.35              | 5.88%          | 2.96%         |
| 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.77                | 0.35              | 6.59%          | 2.97%         | 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.77                | 0.35              | 6.59%          | 2.97%         |
| 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.86                | 0.39              | 7.36%          | 3.29%         | 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.86                | 0.39              | 7.36%          | 3.29%         |
| 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.52                | 0.26              | 4.47%          | 2.24%         | 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.52                | 0.26              | 4.47%          | 2.24%         |
| 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.42                | 0.23              | 3.56%          | 1.93%         | 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.42                | 0.23              | 3.56%          | 1.98%         |
| 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.49                | 0.27              | 4.16%          | 2.27%         | 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.49                | 0.27              | 4.16%          | 2.27%         |
| <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.58</b>         | <b>0.29</b>       | <b>4.99%</b>   | <b>2.47%</b>  | <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.58</b>         | <b>0.29</b>       | <b>4.99%</b>   | <b>2.47%</b>  |
| ServoMode Pressure |                       |                     |                   |                |               | ServoMode Pressure |                       |                     |                   |                |               |
| Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % | Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % |
| 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.92                | 0.40              | 7.02%          | 3.45%         | 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.46                | 0.22              | 3.93%          | 1.07%         |
| 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.49                | 0.22              | 4.16%          | 1.89%         | 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.34                | 0.16              | 2.90%          | 1.35%         |
| 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.53                | 0.29              | 4.49%          | 2.40%         | 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.39                | 0.18              | 3.30%          | 1.53%         |
| 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.44                | 0.19              | 3.79%          | 1.67%         | 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.34                | 0.16              | 2.90%          | 1.35%         |
| 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.55                | 0.24              | 4.74%          | 2.06%         | 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.35                | 0.16              | 3.02%          | 1.36%         |
| 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.66                | 0.29              | 5.64%          | 2.47%         | 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.40                | 0.22              | 4.14%          | 1.05%         |
| 8                  | Friction cycle No. 7  | 1.04                | 0.42              | 8.04%          | 3.99%         | 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.52                | 0.24              | 4.46%          | 2.03%         |
| 9                  | Friction cycle No. 8  | 1.10                | 0.45              | 9.33%          | 3.84%         | 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.54                | 0.25              | 4.59%          | 2.12%         |
| 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.62                | 0.29              | 5.27%          | 2.50%         | 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.41                | 0.19              | 3.50%          | 1.61%         |
| 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.46                | 0.21              | 3.94%          | 1.78%         | 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.31                | 0.14              | 2.61%          | 1.19%         |
| 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.48                | 0.21              | 4.00%          | 1.77%         | 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.33                | 0.15              | 2.79%          | 1.30%         |
| <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.63</b>         | <b>0.28</b>       | <b>5.36%</b>   | <b>2.41%</b>  | <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.39</b>         | <b>0.18</b>       | <b>3.37%</b>   | <b>1.55%</b>  |

Ensaio 3

Ensaio 4

Fonte: (O autor).

Tabela 19 – Comparativo PID entre os ensaios 5 a 8.

| Ensaio 5           |                       |                     |                   |                |               | Ensaio 6           |                       |                     |                   |                |               |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------|
| Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % | Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % |
| 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.72                | 0.43              | 6.20%          | 3.70%         | 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.64                | 0.36              | 5.51%          | 3.06%         |
| 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.57                | 0.33              | 4.09%          | 2.06%         | 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.48                | 0.26              | 4.07%          | 2.18%         |
| 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.59                | 0.33              | 5.06%          | 2.02%         | 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.47                | 0.27              | 4.02%          | 2.30%         |
| 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.41                | 0.22              | 3.53%          | 1.80%         | 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.31                | 0.14              | 2.65%          | 1.23%         |
| 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.40                | 0.21              | 3.40%          | 1.02%         | 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.20                | 0.17              | 2.39%          | 1.44%         |
| 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.56                | 0.32              | 4.77%          | 2.73%         | 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.46                | 0.22              | 3.96%          | 1.06%         |
| 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.70                | 0.42              | 5.96%          | 3.59%         | 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.63                | 0.33              | 5.43%          | 2.80%         |
| 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.07                | 0.52              | 7.45%          | 4.45%         | 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.70                | 0.36              | 6.00%          | 3.12%         |
| 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.54                | 0.31              | 4.60%          | 2.62%         | 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.44                | 0.21              | 3.76%          | 1.83%         |
| 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.38                | 0.19              | 3.26%          | 1.67%         | 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.31                | 0.13              | 2.64%          | 1.09%         |
| 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.38                | 0.20              | 3.22%          | 1.72%         | 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.29                | 0.13              | 2.45%          | 1.07%         |
| <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.54</b>         | <b>0.30</b>       | <b>4.60%</b>   | <b>2.61%</b>  | <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.44</b>         | <b>0.22</b>       | <b>3.75%</b>   | <b>1.92%</b>  |
| ServoMode Pressure |                       |                     |                   |                |               | ServoMode Pressure |                       |                     |                   |                |               |
| Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % | Section            | Section Name          | Média de SSE (abs.) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % |
| 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.47                | 0.29              | 3.98%          | 2.51%         | 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.87                | 0.46              | 7.44%          | 3.93%         |
| 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.41                | 0.25              | 3.52%          | 2.15%         | 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.62                | 0.36              | 5.35%          | 3.11%         |
| 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.40                | 0.27              | 3.39%          | 2.31%         | 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.62                | 0.36              | 5.30%          | 3.00%         |
| 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.29                | 0.14              | 2.52%          | 1.29%         | 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.41                | 0.24              | 3.47%          | 2.05%         |
| 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.29                | 0.13              | 2.44%          | 1.15%         | 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.39                | 0.23              | 3.35%          | 1.90%         |
| 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.44                | 0.23              | 3.78%          | 1.97%         | 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.60                | 0.40              | 5.83%          | 3.46%         |
| 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.51                | 0.28              | 4.39%          | 2.37%         | 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.80                | 0.48              | 6.86%          | 4.14%         |
| 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.52                | 0.28              | 4.43%          | 2.42%         | 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.78                | 0.46              | 6.65%          | 3.93%         |
| 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.38                | 0.19              | 3.22%          | 1.67%         | 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.53                | 0.29              | 4.52%          | 2.46%         |
| 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.31                | 0.15              | 2.67%          | 1.29%         | 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.39                | 0.51              | 3.36%          | 4.36%         |
| 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.28                | 0.13              | 2.39%          | 1.11%         | 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.38                | 0.40              | 3.22%          | 3.39%         |
| <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.38</b>         | <b>0.21</b>       | <b>3.23%</b>   | <b>1.77%</b>  | <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.56</b>         | <b>0.36</b>       | <b>4.83%</b>   | <b>3.12%</b>  |

Ensaio 7

Ensaio 8

Fonte: (O autor).

Tabela 20 – Comparativo PID entre os ensaios 9, 10 e 11.

## Ensaio 9

| ServoMode          | Pressure              |                    |                   |                |               |
|--------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------------|
| Section            | Section Name          | Média de SSE (abs) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % |
| 2                  | Friction cycle No. 1  | 0.50               | 1.22              | 4.93%          | 10.43%        |
| 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.42               | 0.22              | 3.60%          | 7.04%         |
| 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.43               | 1.52              | 3.69%          | 12.99%        |
| 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.29               | 2.39              | 2.47%          | 20.47%        |
| 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.29               | 2.00              | 2.50%          | 17.22%        |
| 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.37               | 0.79              | 3.15%          | 6.79%         |
| 8                  | Friction cycle No. 7  | 0.56               | 2.23              | 4.00%          | 19.08%        |
| 9                  | Friction cycle No. 8  | 0.65               | 1.36              | 5.52%          | 11.68%        |
| 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.40               | 1.36              | 3.41%          | 11.62%        |
| 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.27               | 1.20              | 2.34%          | 10.97%        |
| 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.26               | 1.00              | 2.25%          | 8.54%         |
| <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.40</b>        | <b>1.45</b>       | <b>3.40%</b>   | <b>12.41%</b> |

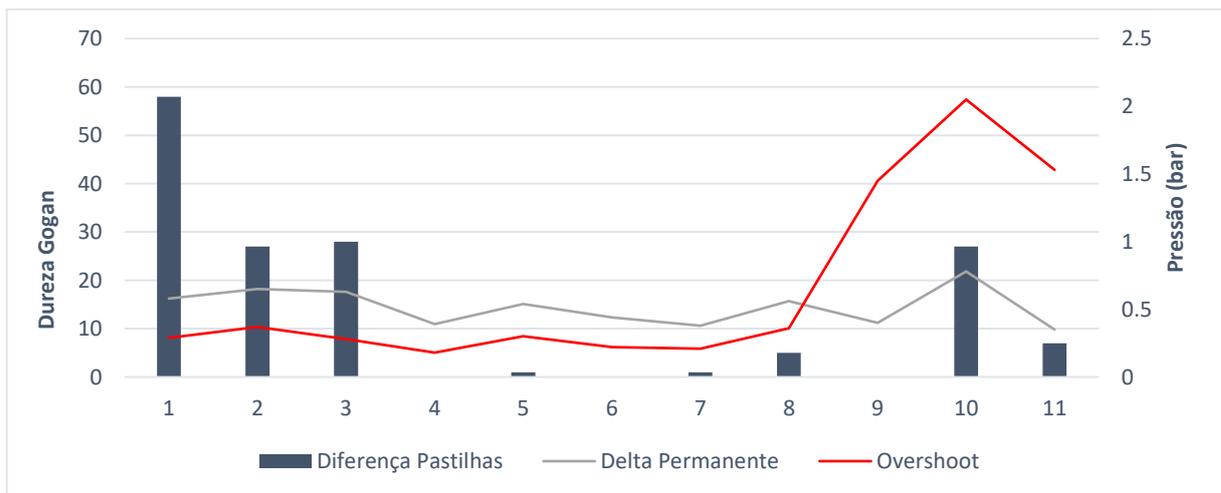
## Ensaio 10

| ServoMode          | Pressure              |                    |                   |                |               |
|--------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------------|
| Section            | Section Name          | Média de SSE (abs) | Média de OS (abs) | Média de SSE % | Média de OS % |
| 2                  | Friction cycle No. 1  | 1.07               | 0.04              | 9.16%          | 7.16%         |
| 3                  | Friction cycle No. 2  | 0.04               | 0.94              | 7.16%          | 8.07%         |
| 4                  | Friction cycle No. 3  | 0.91               | 3.23              | 7.01%          | 27.69%        |
| 5                  | Friction cycle No. 4  | 0.59               | 2.02              | 5.07%          | 24.00%        |
| 6                  | Friction cycle No. 5  | 0.56               | 2.59              | 4.79%          | 22.15%        |
| 7                  | Friction cycle No. 6  | 0.90               | 2.67              | 8.34%          | 22.72%        |
| 8                  | Friction cycle No. 7  | 1.05               | 1.22              | 9.99%          | 10.39%        |
| 9                  | Friction cycle No. 8  | 1.19               | 2.09              | 10.20%         | 17.04%        |
| 10                 | Friction cycle No. 9  | 0.74               | 2.25              | 6.30%          | 19.21%        |
| 11                 | Friction cycle No. 10 | 0.49               | 1.40              | 4.17%          | 12.69%        |
| 12                 | Friction cycle No. 11 | 0.56               | 2.12              | 4.75%          | 10.15%        |
| <b>Total Geral</b> |                       | <b>0.78</b>        | <b>2.05</b>       | <b>6.67%</b>   | <b>17.49%</b> |

## Ensaio 11

Fonte: (O autor)

O comparativo do comportamento da dureza foi realizado através dos dados obtidos e registrados conforme a Tabela 10, e leva em conta os materiais testados, as durezas médias das pastilhas internas e externas utilizadas, e os erros absolutos de cada regime (permanente e transitório), sendo os resultados melhor visualizados na Figura 34.

Figura 34 – Heterogeneidade dos valores de dureza das amostras *versus* comportamento PID.

Fonte: (O autor).

A Tabela 21 apresenta, em ordem crescente, o nível de erro no regime permanente como referência; e pode-se observar as quatro maiores variações apontadas: os ensaios 1, 2, 3, e 10

fazem parte da classificação de dureza apontada como “A” (alta heterogeneidade entre pastilha externa e interna).

Tabela 21 – Comparativo dureza Gogan versus erros de controle.

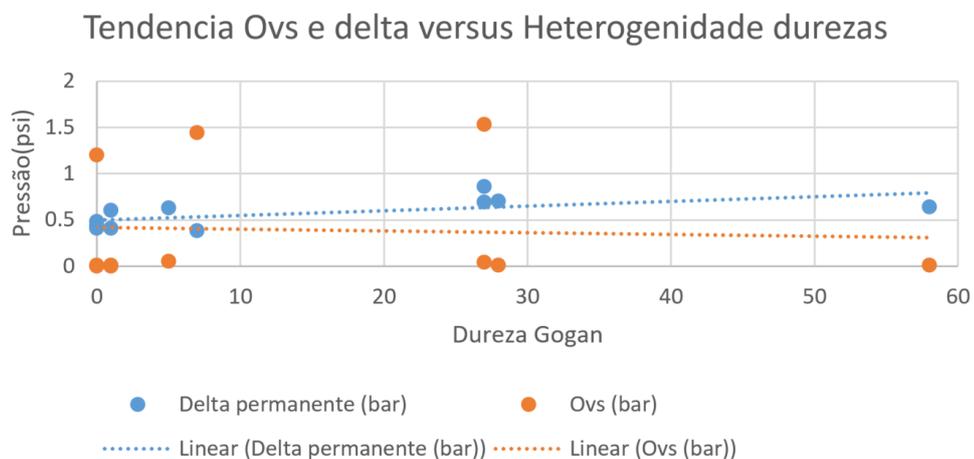
| Ensaio | CA         | ID AMOSTRA | Interna | Externa | GC Média Pastilha Interna | GC Média Pastilha Externa | Delta permanente (bar) | Ovs (bar) |
|--------|------------|------------|---------|---------|---------------------------|---------------------------|------------------------|-----------|
| 11     | CA-0140-21 | PM3        | 18A     | 1A      | 33                        | 40                        | 0.35                   | 1.53      |
| 7      | CA-0136-21 | M1         | 8A      | 8B      | 27                        | 28                        | 0.38                   | 0.21      |
| 4      | CA-0133-21 | PB1        | 1B      | 28B     | 28                        | 28                        | 0.39                   | 0.18      |
| 9      | CA-0138-21 | XB         | 2A      | 2B      | 27                        | 27                        | 0.4                    | 1.45      |
| 6      | CA-0135-21 | B1         | 3A      | 3B      | 29                        | 29                        | 0.44                   | 0.22      |
| 5      | CA-0134-21 | B2         | 7B      | 7A      | 28                        | 27                        | 0.54                   | 0.3       |
| 8      | CA-0137-21 | M2         | 26B     | 26A     | 30                        | 35                        | 0.56                   | 0.36      |
| 1      | CA-0130-21 | XA         | 12A     | 12B     | 88                        | 30                        | 0.58                   | 0.29      |
| 3      | CA-0132-21 | PA3        | 13A     | 18B     | 59                        | 31                        | 0.63                   | 0.28      |
| 2      | CA-0131-21 | A1         | 16B     | 16A     | 30                        | 57                        | 0.65                   | 0.37      |
| 10     | CA-0139-21 | A2         | 22B     | 22A     | 27                        | 54                        | 0.78                   | 2.05      |

Fonte: (O autor)

Ao avaliar os valores de sobressinal, não se observam resultados conclusivos pois não há uma tendência de comportamento dinâmico de erro associado ao desvio padrão de dureza. É possível verificar também o comportamento bem atípico do sobressinal que acontece entre os ensaios 9 e 10, onde se obtém um crescimento de 569%, comportamento que impossibilita uma avaliação mais clara de tendência.

Na Figura 35 é observado que o delta de erro no regime permanente traz uma tendência clara do comportamento entre as relações de dureza e variação de pressão, o que aponta nitidamente a existência de uma correlação das grandezas. Fica nítida a alta dispersão de resultados e uma tendência de queda para o erro em regime transitório, comportamento que confirma que não existe conclusão para o comparativo de sobressinal.

Figura 35 – Comportamento de erro conforme heterogeneidades nos valores de dureza das amostras.



Fonte: (O autor).

### 4.3 COMPARATIVO ENTRE DESALINHAMENTO DO DISCO

O estudo comparativo foi realizado seguindo a norma ECER90, porém adaptado o procedimento para quatro conjuntos de frenagens. Em todas as etapas o servo controle é regido por pressão, porém na primeira etapa (com setenta frenagens) e nas três restantes (com seis frenagens em cada etapa), totalizando assim oitenta e oito frenagens por ensaio.

O ensaio um e dois foram executados com todos parâmetros configurados iguais, sendo:

- Amostras feitas de material de mesmo lote de produção e retiradas do mesmo ponto da respectiva lona (minimizando heterogeneidades);
- Caliper: 60 mm (diâmetro embolo);
- Disco: 278 mm × 12 mm; e,
- Inercia utilizada: 80 kg/m<sup>2</sup>.

Como esclarecido na seção 3.5, foram apenas modificados os parâmetros de desalinhamento do disco de freio, onde o ensaio 1 foi executado com um desalinhamento de 0,02 mm, o que é considerado ótimo e aceitável para sua realização; e o ensaio 2 sendo executado com desalinhamento de 0,1 mm, introduzindo de maneira forçada um alto *run-out* para fins de comparativo. Pode-se observar os resultados de erros calculados na planilha de quantificação apresentada na Tabela 22, e seus resultados plotados na Figura 26.

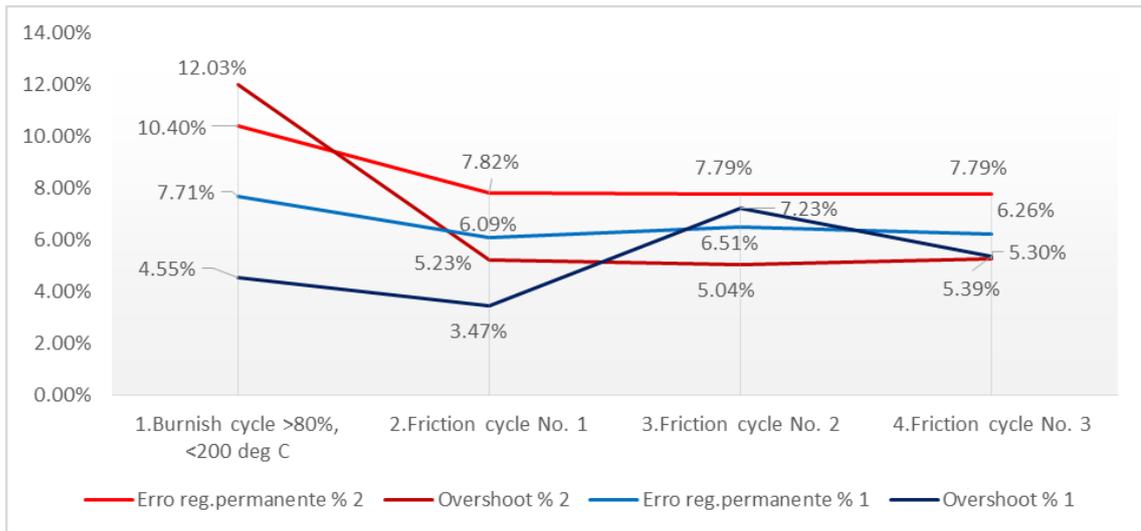
Tabela 22 – Erros de PID lidos nos ensaios 1 e 2.

| Section            | Section Name                                 | Erro reg.permanente % 2 | Overshoot % 2 | Erro reg.permanente % | Overshoot % 1 |
|--------------------|--|-------------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| 1                  | 1.Burnish cycle >80%, <200 deg C             | 10.40%                  | 12.03%        | 7.71%                 | 4.55%         |
| 2                  | 2.Friction cycle No. 1                       | 7.82%                   | 5.23%         | 6.09%                 | 3.47%         |
| 3                  | 3.Friction cycle No. 2                       | 7.79%                   | 5.04%         | 6.51%                 | 7.23%         |
| 4                  | 4.Friction cycle No. 3                       | 7.79%                   | 5.30%         | 6.26%                 | 5.39%         |
| 999                | Instrument check stops as first burnish cycl | 8.78%                   | 8.62%         | 7.05%                 | 8.08%         |
| <b>Total Geral</b> |  | <b>9.73%</b>            | <b>10.32%</b> | <b>7.36%</b>          | <b>4.97%</b>  |

Fonte: (O autor).

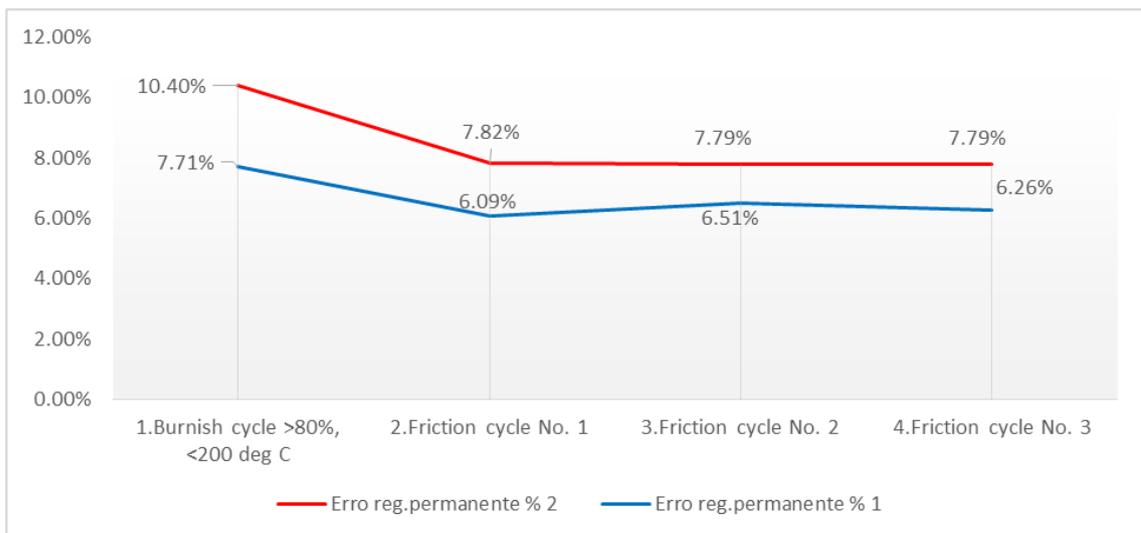
Para realizar o comparativo foi necessário separar os dois ensaios quanto a região do erro e seu comportamento. Neste sentido, pode-se verificar na Figura 37 apenas o percentil de erro do ensaio realizado no regime permanente. O ensaio com disco alinhado (ensaio 1), inicia-se com um erro em torno de 7,71%, e após estabiliza este na casa dos 6,26% para os demais ciclos. Já o ensaio 2, inicia com um erro de 10,40% no nível de pressão em seu regime permanente, o qual estabiliza-se 7,8%, confirmando a tendência de estabilização em um patamar 25% maior que o evidenciado no ensaio realizado com disco alinhado.

Figura 36 – Comportamento dos erros em regime permanente e transitório medidos nos ensaios 1 e 2.



Fonte: (O autor).

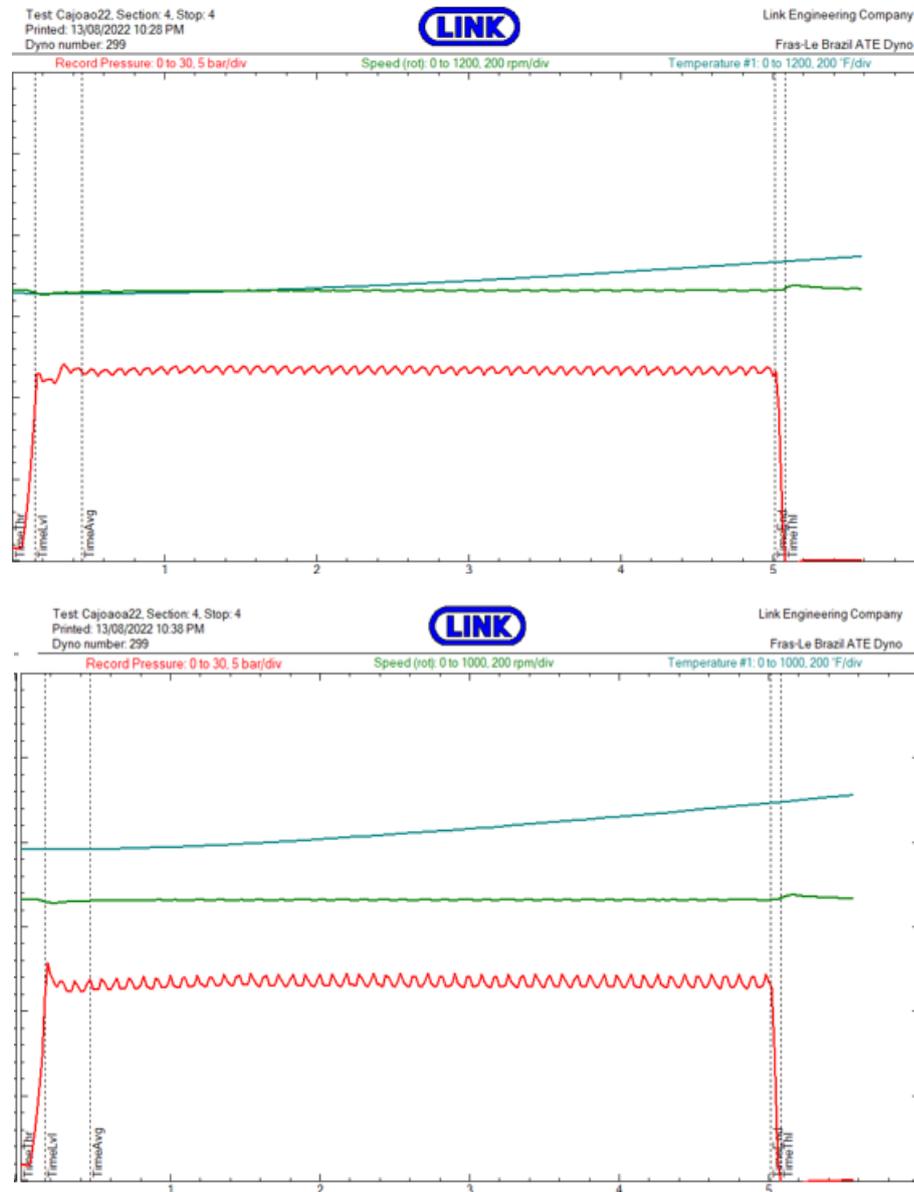
Figura 37 – Comportamento isolado dos erros em regime permanente nos ensaios 1 e 2



Fonte: (O autor)

Essa tendência de variação maior no ensaio 2 pode ser observada também de maneira gráfica quando comparado visualmente a mesma frenagem em ensaios diferentes (stop 4 da seção 4). Neste sentido, na Figura 38 observa-se na primeira imagem a frenagem sem desalinhamento, e segunda imagem a mesma frenagem, porém com o desalinhamento proposto. Dessa forma, é nítida a variação maior do processo do controle PID no ensaio 2.

Figura 38 – Comparativo de comportamento do controle PID entre stop em ensaio 1 e 2, sem desalinhamento.



Fonte: (O autor)

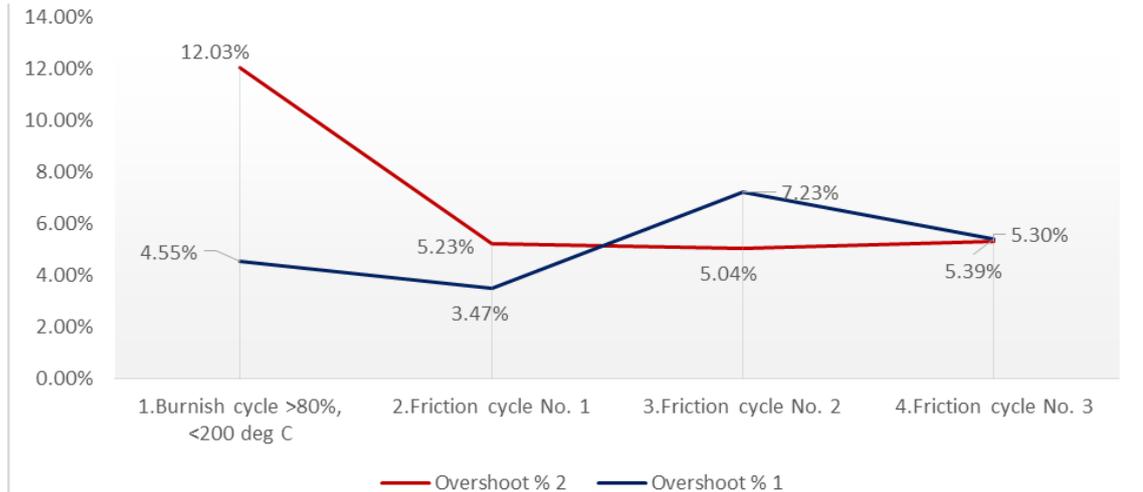
Ao observar apenas o comportamento em regime transitório mostrado na

Figura 39, nota-se nitidamente a diferença entre os dois ensaios. Enquanto o ensaio 1 tem *overshoot* médio de 4,55% em seu assentamento, o ensaio 2 começa o assentamento com o sobressinal 2,64 vezes maior que o ensaio 1, chegando na casa do 12,05%. O sobressinal excessivo diminui consideravelmente após as 70 frenagens iniciais, estabilizando em torno de 5% até o final do ensaio.

Esse comportamento de sobressinal excessivo no assentamento se dá pelo par tribológico não estar alinhado, fazendo com que a pressão aplicada sobre o pistão na área da

pastilha no disco seja variável, por existir uma angulação de contato entre ambos. Após a pastilha assentada, mesmo que angulada, ela casa com o disco também desalinhado, fazendo com que diminua e estabilize o controle PID no regime transitório de aplicação.

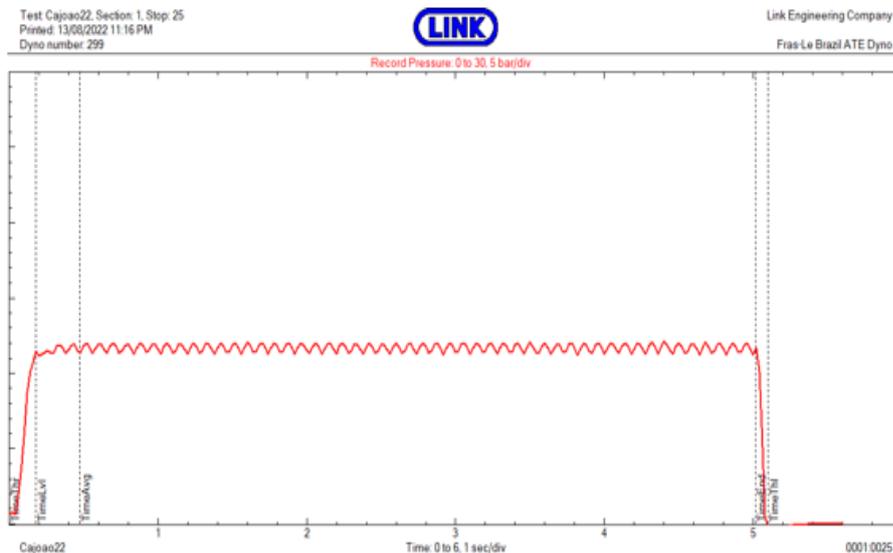
Figura 39 – Comportamento isolado dos erros em regime transitório nos ensaios 1 e 2.

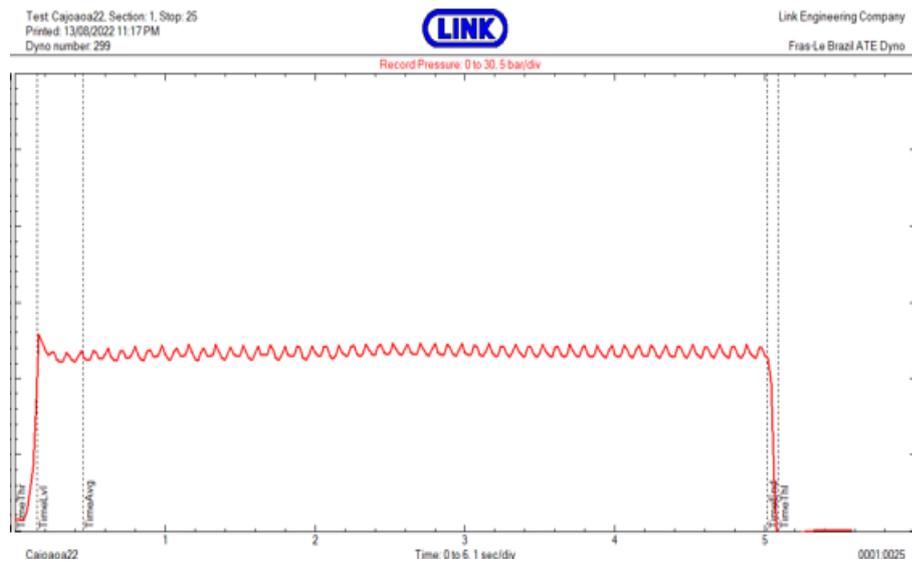


Fonte: (O autor).

O *overshoot* excessivo pode ser observado e comparado visualmente na Figura 40, onde na imagem acima e abaixo são evidenciados o comportamento dinâmico do stop 25 da seção 1 nos ensaios 1 e 2 respectivamente, concluindo assim também qualitativamente a presença de *overshoot* no ensaio 2.

Figura 40 – Comparativo de comportamento do controle PID entre stop em ensaio 1 e 2, com desalinhamento.





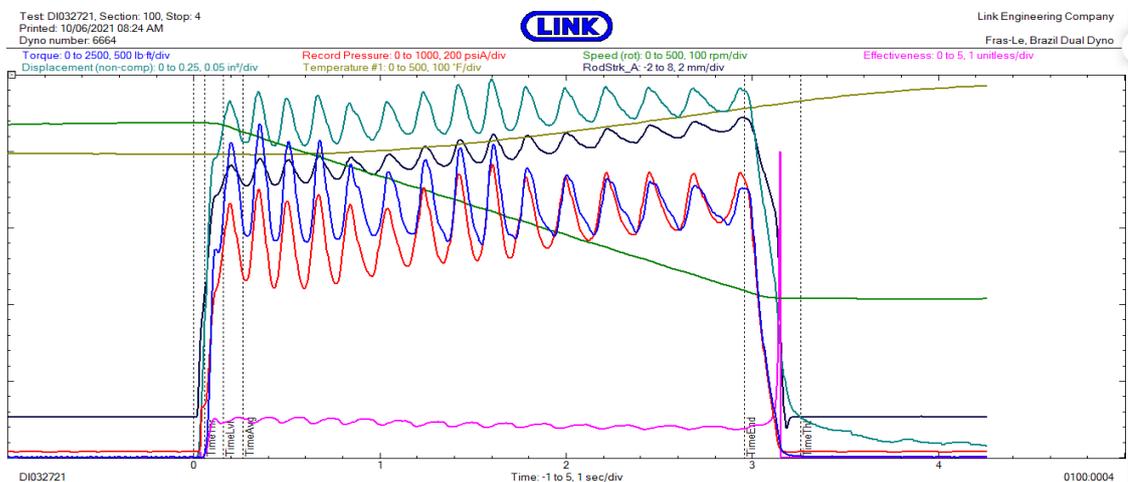
Fonte: (O autor).

#### 4.4 ESTUDO DE CASO

##### 4.4.1 Análise e correção de falha em leituras

Neste estudo, inicialmente foi protocolado um chamado de manutenção de calibração do controle PID da servoválvula do dinamômetro tipo “B”, dinamômetro com mais recursos de instrumentação do laboratório P&D da Fras-le. A variação excessiva pré-ajuste dos parâmetros pode ser observada na Figura 41, e faz com que o ensaio fique fora da normativa e seja encerrado temporariamente para calibração dos parâmetros PID da servoválvula.

Figura 41 – Comportamento do controle PID pré-ajuste de parâmetros da servoválvula.



Fonte: (O autor).

Durante a manutenção desse problema foi modificados os parâmetros de proporcional, integral e derivada do controle, afim de retirar o sobressinal e diminuir o erro do sistema em regime permanente, erro que pôde ser observado previamente na Figura 41. A modificação de parâmetros foi feita de acordo com a Tabela 23.

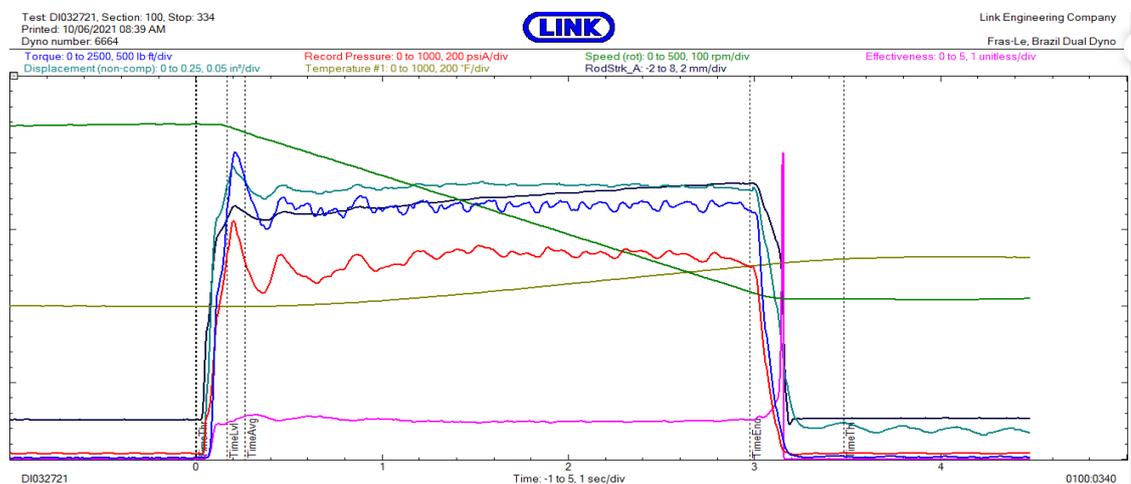
Tabela 23 – Ajuste de parâmetros para manutenção da servoválvula.

|             | Proporcional | Integral | Derivada |
|-------------|--------------|----------|----------|
| Pré Ajuste  | 30           | 5        | 0        |
| Após Ajuste | 20           | 12       | 0        |

Fonte: (O autor).

Após a modificação de parâmetros pela equipe de manutenção, com o assessoramento do autor do presente trabalho, foi diagnosticado que tal equipamento não estava apto a continuar o processo de ensaio pois seu comportamento não estava dentro do ideal para tal método, ainda com sobressinal presente de maneira excessiva conforme mostrado na Figura 45.

Figura 42 – Comportamento do controle PID após realizar o ajuste de parâmetros da servoválvula.

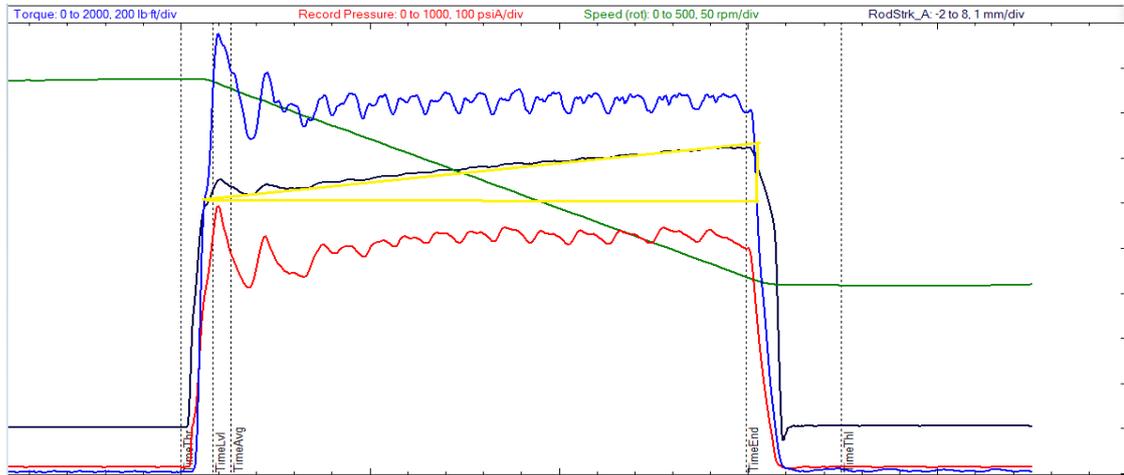


Fonte: (O autor).

Para resolução do problema foi feita uma análise de possíveis sensores presentes no dinamômetro e verificação de comportamentos diferentes do usual. Nessa investigação foi verificado que o sensor linear de deslocamento (situado no cilindro mestre e com finalidade de mensurar o deslocamento do embolo no cilindro) estava com angulação e comportamento crescente no decorrer de uma frenagem. Na visualização da Figura 46 é possível observar a

linha em preto para deslocamento do LVDT (transformadores lineares variáveis diferenciais), esse deslocamento crescente representa uma tentativa do controlador deixar constante a pressão, acionando o cilindro, o que teoricamente não é um comportamento normal do sistema.

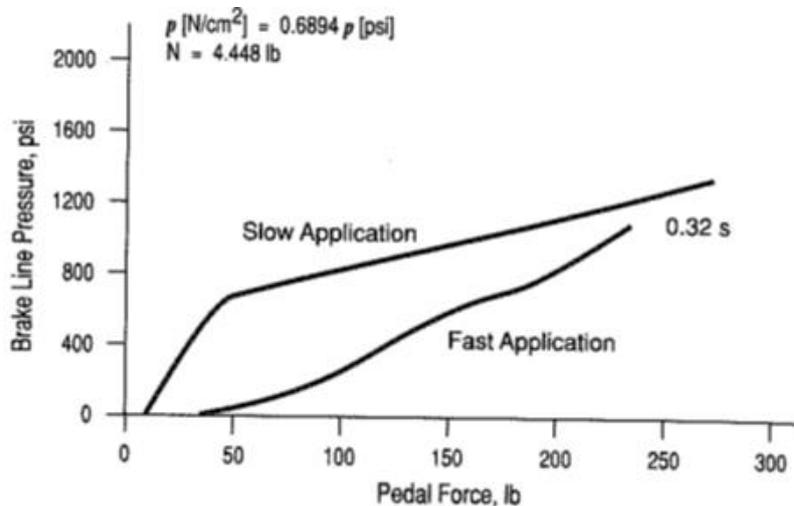
Figura 43 – Comportamento de aplicação do controle PID conforme evolução da pressão.



Fonte: (O autor).

Analisando a Figura 44 é possível entender que para uma aplicação direta em um sistema de freio sem a presença do servo-freio (hidro vácuo), existe uma relação direta entre a pressão aplicada no pedal pelo condutor e a pressão do sistema. Neste caso, quanto maior a força aplicada pelo condutor, maior é a pressão no sistema de freios, comportamento diferente do que estava acontecendo no dinamômetro “tipo B” durante esse ajuste.

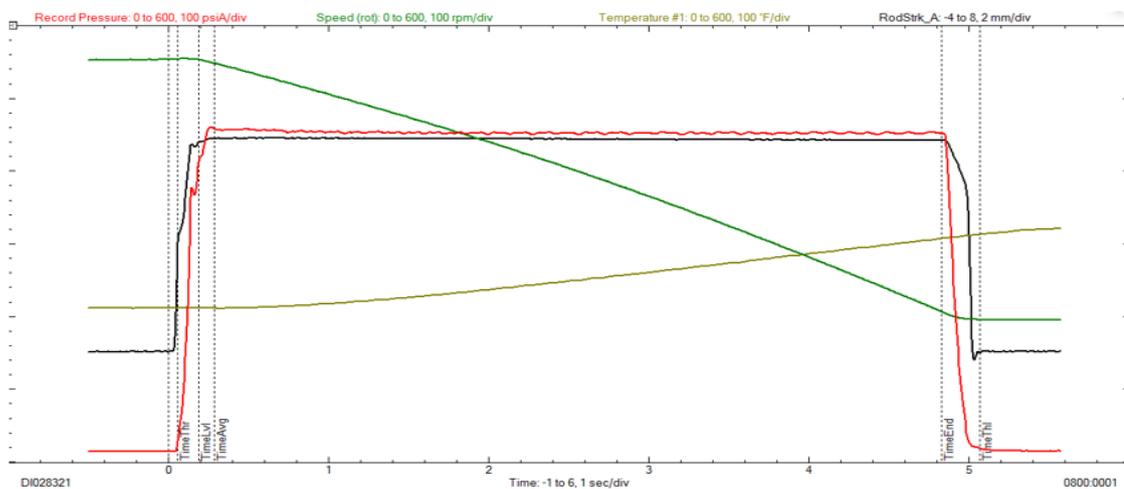
Figura 44 – Aplicação do freio *versus* pressão.



Fonte: (Limpert, 1999).

Para mitigar tal efeito, o cilindro mestre do dinamômetro foi substituído, para corrigir um defeito em sua vedação. A falta de vedação fez com que durante a sua aplicação ele perdesse pressão, levando a malha fechada do controlador a sempre tentar aplicar mais carga para manter a pressão constante. Com a simples troca do cilindro mestre foi possível corrigir o problema, pois conforme mostrado na Figura 45, o sobressinal zerado e com variação nula, juntamente com a pressão (curva em vermelho) e o acionamento do cilindro (curva em preto) com comportamentos semelhantes e seguindo uma mesma tendência. O ajuste realizado e a correção do problema fizeram com que o dinamômetro fosse liberado para prosseguimento dos ensaios.

Figura 45 – Comportamento do controle PID do dinamômetro B após troca do cilindro mestre.



Fonte: (O autor).

A partir da análise realizada foi possível identificar a influência do controle PID quando o funcionamento dos componentes do sistema não ocorre conforme esperado. Esse exemplo foi solucionado devido a análise criteriosa dos parâmetros PID, e conclui-se que para uma ótima calibração e ajuste de seu controlador, é necessário que os componentes estejam alinhados e de acordo com seu funcionamento normal. É possível também inferir que o comportamento em regime permanente e transitório pode ser uma ferramenta de trabalho e investigação para auxiliar na manutenção preventiva de equipamentos, de acordo com o avanço deste estudo.

#### 4.4.2 Tipos de Freios e comportamento PID

Essa análise, que foi realizada durante três meses ao longo do ano de 2021, teve como objetivo principal mapear e entender o comportamento dos ensaios de mesmo método, segundo as trocas de freios durante o decorrer do tempo. Juntamente com essa análise, será aqui

apresentada uma proposição de mudança no processo do laboratório para tentar minimizar problemas de controle e paradas de manutenção recorrentes para tal problemática.

Por necessidade do laboratório, foi mapeado todos os ensaios do dinamômetro “tipo Z” que utilizam do método FMVSS 121 (ensaio federal de desempenho dos Estados Unidos Da América).. Este método é diretamente afetado caso exista grande variação no controle PID, pois utilizam de valores máximos para aferição o que faz com que qualquer sobressinal ou variação excessiva possa mascarar resultados médios, comprometendo todo o resultado do ensaio apenas por falta de ajuste de controle.

Dentro do método FMVSS 121 foi identificado duas etapas com grandes problemas de ajuste: *Brake Power* e *Brake recovery*. Assim, para o estudo foi mapeado durante os três meses todos os ensaios que rodaram o método no dinamômetro “tipo Z”, catalogando seu freio, e posteriormente quantificando todos os erros em regime permanente e sobressinal que obtiveram nas duas seções críticas do ensaio. Esses dados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Mapeamento dos erros de controle para ensaio do dinamômetro "tipo Z".

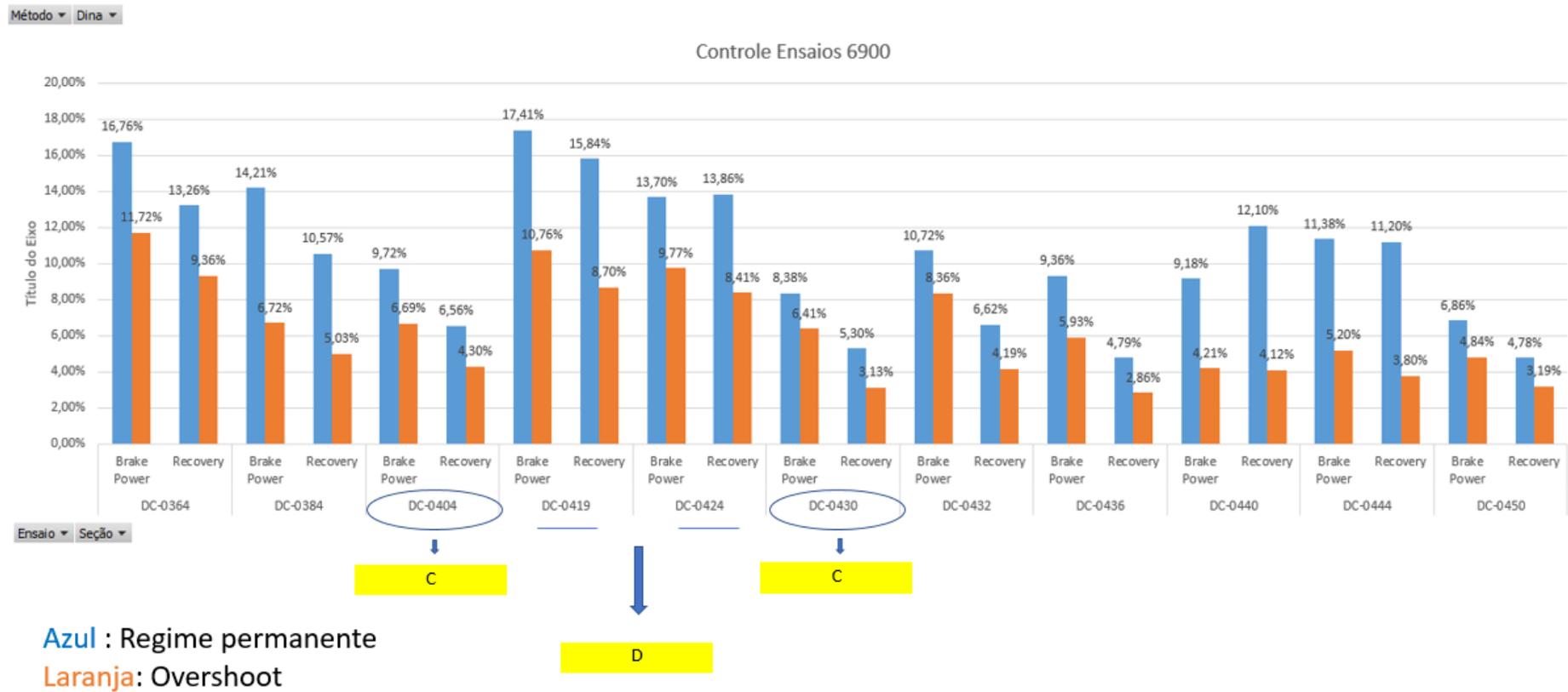
| <b>Ensaio</b> | <b>Seção</b> | <b>Freio</b>                  | <b>Método</b> | <b>Delta</b> | <b>OVS</b> |
|---------------|--------------|-------------------------------|---------------|--------------|------------|
| 0450          | Brake Power  | A_20k_rr.20.8_cam3030_alav5.5 | FMVSS 121     | 6,86%        | 4,84%      |
| 0450          | Recovery     | A_20k_rr.20.8_cam3030_alav5.5 | FMVSS 121     | 4,78%        | 3,19%      |
| 0444          | Brake Power  | B_26K_rr20.8_cam3030_alav7    | FMVSS 121     | 11,38%       | 5,20%      |
| 0444          | Recovery     | B_26K_rr20.8_cam3030_alav7    | FMVSS 121     | 11,20%       | 3,80%      |
| 0440          | Brake Power  | B_26K_rr20.8_cam3030_alav6    | FMVSS 121     | 9,18%        | 4,21%      |
| 40            | Recovery     | B_26K_rr20.8_cam3030_alav6    | FMVSS 121     | 12,10%       | 4,12%      |
| 0436          | Brake Power  | C                             | FMVSS 121     | 9,36%        | 5,93%      |
| 0436          | Recovery     | C                             | FMVSS 121     | 4,79%        | 2,86%      |
| 0432          | Brake Power  | C                             | FMVSS 121     | 10,72%       | 8,36%      |
| 0432          | Recovery     | C                             | FMVSS 121     | 6,62%        | 4,19%      |
| 0430          | Brake Power  | C                             | FMVSS 121     | 8,38%        | 6,41%      |
| 0430          | Recovery     | C                             | FMVSS 121     | 5,30%        | 3,13%      |
| 0424          | Brake Power  | D                             | FMVSS 121     | 13,70%       | 9,77%      |
| 0424          | Recovery     | D                             | FMVSS 121     | 13,86%       | 8,41%      |
| 0419          | Brake Power  | D                             | FMVSS 121     | 17,41%       | 10,76%     |
| 0419          | Recovery     | D                             | FMVSS 121     | 15,84%       | 8,70%      |
| 0404          | Brake Power  | C                             | FMVSS 121     | 9,72%        | 6,69%      |
| 0404          | Recovery     | C                             | FMVSS 121     | 6,56%        | 4,30%      |
| 0384          | Brake Power  | B_26K_rr20.8_cam3030_alv6     | FMVSS 121     | 14,21%       | 6,72%      |
| 0384          | Recovery     | B_26K_rr20.8_cam3030_alv6     | FMVSS 121     | 10,57%       | 5,03%      |
| 0364          | Brake Power  | A_20K_rr20.8_cam3030_alav5.5  | FMVSS 121     | 16,76%       | 11,72%     |
| 0364          | Recovery     | A_20K_rr20.8_cam3030_alav5.5  | FMVSS 121     | 13,26%       | 9,36%      |

Fonte: (O autor).

Observa-se na Tabela 24 uma grande variação de valores para cada tipo de freio. Em geral, é necessário sempre antes de iniciar o ensaio calibrar e ajustar os seu parâmetros, a fim de ter uma variação mínima durante o teste, executando-o sem grandes picos nos valores de

pressão ou torque. Na Figura 46 pode-se observar todas variâncias de controle para as duas principais seções ao longo do tempo, e suas respectivas trocas de freio.

Figura 46 – Variação do controle PID nos ensaios com o dinamometro “tipo Z”.



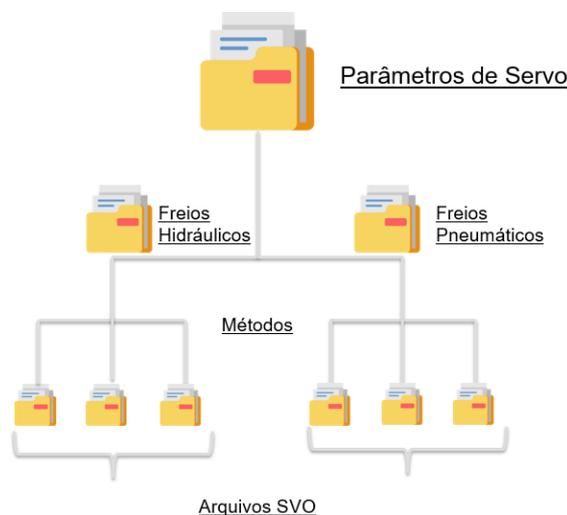
Fonte: (O autor).

Ao analisar os dados da Figura 46, é possível verificar uma grande diferença de variação do sobressinal em regime permanente do ensaio 404 para o ensaio 419. Um ponto importante é verificar que, sem nenhuma mudança de parâmetro, o ensaio 430 resultou em uma queda no erro, levando novamente a um patamar de 8,38% de variação máxima, muito semelhante ao ensaio 404. Essa variação se deu em função da troca do freio C que estava sendo ensaiado, voltando para o freio D. Levando em conta que a troca do freio é necessária para conjunto que irá ser avaliado, a solução prévia para diminuir os 17,41% de erro no regime permanente e de 10,76% no regime transitório, seria o ajuste de parâmetros para cada tipo de freio configurado. Esse fato cria um grande problema para a equipe de manutenção que precisa de maneira repetitiva ajustar parâmetros a cada ensaio feito. Tal modo de operação é inviável para o processo produtivo do laboratório.

Para solucionar o problema relatado, o autor do presente trabalho efetuou uma mudança de processo pré-ensaio, fazendo com que para cada freio ajustado os arquivos referentes ao ensaio sejam salvos em um banco de dados. A utilização do banco de dados minimiza ao máximo a configuração e os chamados de manutenção para ajustes de controle pois após configurados uma vez, não é necessária uma nova verificação.

A ferramenta de gravação de parâmetros PID foi localizada dentro da plataforma Revdata+®®, e consiste em um arquivo com extensão “svo” que é salvo toda vez que é realizado algum ajuste. Para o processo ser efetivo, o salvamento dos dados foi dividido em pastas segundo os dois tipos de acionamento de freio, e com os diferentes tipos de métodos, juntamente com o arquivo identificando cada configuração de freio utilizado (Figura 47).

Figura 47 – Fluxo de salvamento de arquivos SVO.



Fonte: (O autor).

Com a criação dessa ferramenta foi possível indicar no *script* do ensaio, antes de sua inicialização o nome do arquivo SVO, fazendo com que o ensaio seja executado automaticamente com os parâmetros já configurados em seu banco de dados. É importante que todos os arquivos salvos na pasta estejam dentro da faixa de tolerância aceitável para cada método. Para isso, nessa fase é importante a utilização do modelo matemático criado pelo autor e explicado na seção 4.1.1.

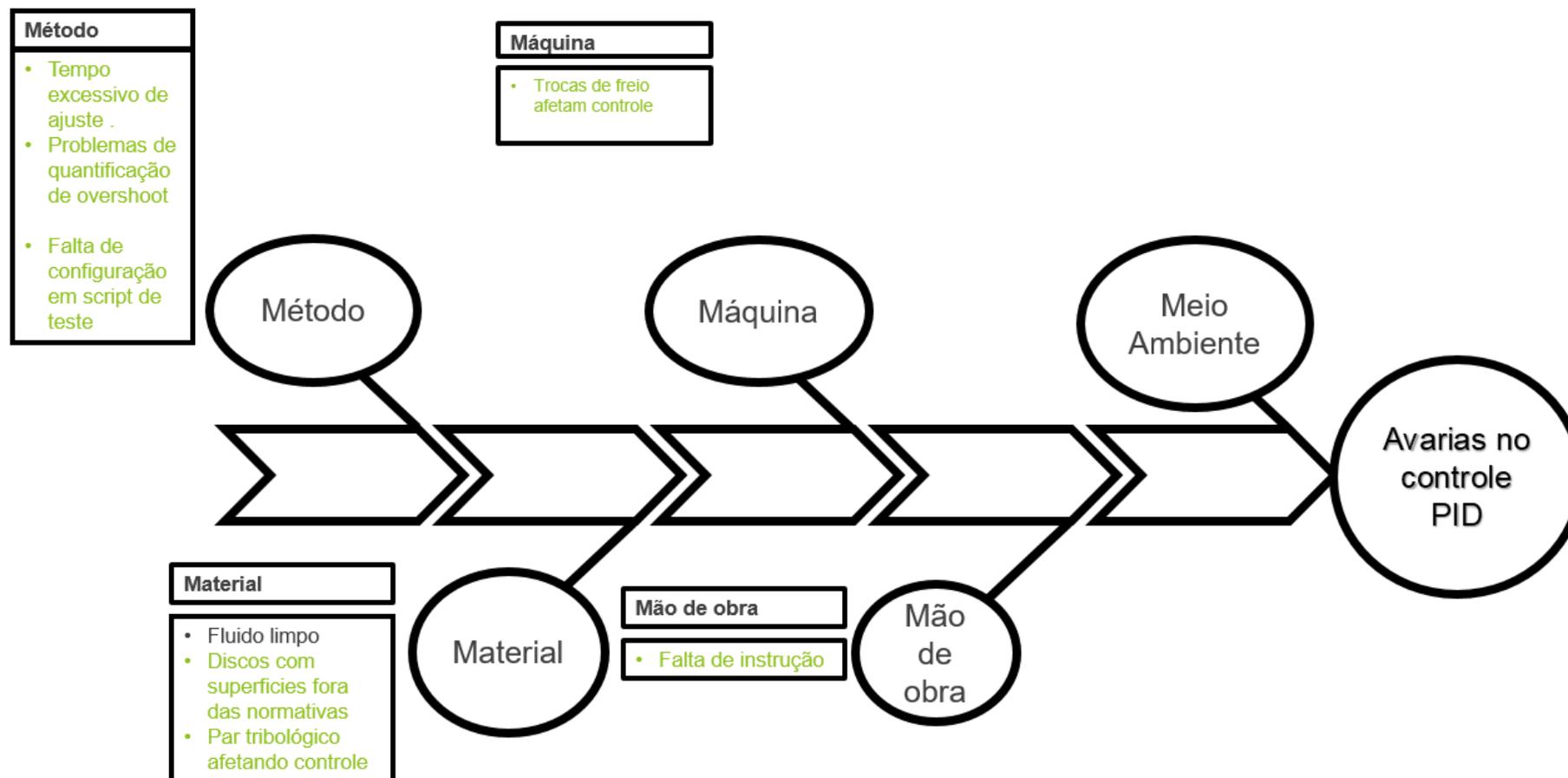
## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Baseando-se no resultado das análises realizadas pode-se confirmar algumas hipóteses citadas no diagrama de Ishikawa, indicadas na Figura 48, levando a entender que:

- A necessidade citada de quantificação de erros em regimes permanentes e transitórios foi suprida pelos modelos matemáticos propostos e validados.
- Os modelos matemáticos propostos também foram primordiais para reduzir o tempo de ajuste de controle, realizado pelas equipes de manutenção;
- A heterogeneidade das durezas entre as amostras afeta diretamente a variância de controle de pressão e torque no regime permanente, mostrando que as características do material têm importância sobre o controle PID;
- Os elevados valores de *Run-out* na superfície do disco de freio afetam diretamente o regime permanente durante a execução de os ensaios, reduzindo consideravelmente a confiabilidade dos seus resultados;
- No regime transitório, verificaram-se valores elevados de sobressinais até o final do assentamento das pastilhas, quando existe um desalinhamento entre o disco e pastilha;
- Problemas mecânicos afetam diretamente o controle PID do sistema. Assim, é importante sempre avaliar os componentes que compõe o equipamento quando o controle PID não estabiliza de forma convencional após realizar a mudança dos parâmetros de ensaio, levando o sistema a comportamentos fora do padrão. Tais comportamentos indicam a provável necessidade de manutenção do dinamômetro; e,
- De acordo com o estudo realizado, cada tipo de freio tem uma resposta diferente ao sistema de controle, sendo proposta a criação de um banco de dados para parametrizar os valores aplicados que levaram à uma boa resposta para cada freio e, posteriormente, reconhecer tais parâmetros para configuração no script de cada teste.

Figura 48 – Diagrama Ishikawa com os apontamentos validados no presente trabalho de conclusão de curso.



Fonte: (O autor).

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho abriu possibilidades e trouxe resultados suficientes para pesquisas mais amplas dentro do tema abordado. Como sugestões para dar continuidade a esse estudo pode-se apontar:

- Utilizar os dados de heterogeneidade de durezas em cinco pontos, feitas para o grupo 1 no tópico 4.2.1, afim de avaliar quais pontos de uma amostra contém um comportamento mais estável de controle para o ensaio em dinamômetro “tipo A”;
- Avaliar e estudar possíveis correlações entre os valores medidos de coeficiente de atrito e o controle PID; e,
- Comprovar a hipótese de ruído pontuada no Ishikawa, avaliando assim os comportamentos dinâmicos do sistema de freio em ensaios com ruídos extremos.

## REFERÊNCIAS

A, AKAY: **Acoustics of friction**, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), p.1534, 2002

BAKER, A.K.; **Vehicle braking**, Ed. Pentech Press, London, 1986.

BUDYNAS, Richard G. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555554/cfi/2!/4/4@0.00:0.00>. Acesso em: 14 agosto. 2022.

CAIXETA, L. G. DA R. 2017. **Projeto de Dinamômetro Inercial Automatizado Para Analisar o Comportamento em Desgaste de Sistemas de Freio de Veículos Leves**, Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 49A/2017, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 102p.

COELHO, L.R. **Caracterização da superfície de frenagem do tambor de freio de veículos comerciais após ensaios em dinamômetro**, 2014

CONTROIL, **Catalogo de produtos**. p .183, 2014

ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. **Regulation 90: uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies, drum brake linings and discs and drums for power-driven vehicles and their trailers**, 2020.

ERIKSON, M. **Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal**. Uppsala: The Angstrom laboratory, p.11, 2000

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; **Fundamentos de Física: mecânica**, vol. 1, 9ª edição, Grupo Gen –LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

INFANTINI, M. B. **Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, RS: 2008.

LINK, **Servo Control for Dynamometer Application Systems**, 2009.

LIMPERT, R. **Brake Design and Safety**. 2nd Edition, SAE International, Warrendale.1999

MAGIONI, L.; CASAGRANDE, D.E.; DOS SANTOS, R.L.; CHIU, J.O.; ROMAN, A.; BERALDO, C.E.M.; **Influence of brake drum stiffness on the functionality of automatic slack adjuster**, SAE Technical paper 2015-36-0012 (ISSN 0148-7191), 12th SAE Brazil International Brake Colloquium & Engineering Display, Brazil, 2015.

MATOZO, L.T.; **Análise de materiais de fundo de alto amortecimento e de seus efeitos em pastilhas de freio**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2006.

MENETRIER, Ademir R. **Estudo de variáveis de composição e processo para controle da compressibilidade**. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

MOOG, **Catálogo** 2012 Disponível em:  
[https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-ServoValves-MFB\\_Technology-Overview-en.pdf](https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-ServoValves-MFB_Technology-Overview-en.pdf) Acesso em : 14, agosto, 2022

NORTON, ROBERT L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Disponível em:  
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582600238/cfi/0!/4/4@0.00:0.00>.  
Acesso em: 14 agosto. 2022.

PIRES, LUIS. **Always standing robot**. 2018. 10.13140/RG.2.2.28491.85289.

RUZZI, M.H.; **Medições das propriedades dinâmicas de materiais de pastilhas de freios automotivos**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2004.

THERMOID, **Apostila Técnica de Instrução**, (2009).

UFPR, **Fundamentos de dinâmica veicular**, anotações de aula - capítulo 3, 2020. Disponível em: <[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Aulas/Cap%203%20-%20Transmissao%20de%20forca%20pneu-pista-Parte%20II%20-%20Freios/Cap\\_03-Transmissao\\_de\\_forca\\_pneu\\_pista-Parte%20II-Freios.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Aulas/Cap%203%20-%20Transmissao%20de%20forca%20pneu-pista-Parte%20II%20-%20Freios/Cap_03-Transmissao_de_forca_pneu_pista-Parte%20II-Freios.pdf)> Acesso em: 14 de agosto de 2022

VALIN FREIOS, **Catalogo de produtos**, 2022 Disponível em: <<http://www.valin.com.br/fras-le/lonas-de-freio/lonas-de-freio-randon.php>> Acesso em: 14 de agosto de 2022



## A.2 Pastilhas de freio do Grupo 2.

Tabela 26 – Resultados das leituras realizadas sobre as pastilhas do Grupo 2, no lado A.

| FRAS-LE <sup>®</sup><br>Uma Empresa Randon  |              | LABORATÓRIO FÍSICO - SIDE P              |                                   |               |   |                   |                       |                              | Mod: 0241 Edição: C |                      |                        |
|---|--------------|--|-----------------------------------|---------------|---|-------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
|   |              | Resultado de Ensaio de Dureza            |                                   |               |   |                   |                       |                              | Emissão: 22/05/14   |                      |                        |
|   |              |  |                                   |               |   |                   |                       |                              | Revisão: 31/05/19   |                      |                        |
| Solicitação de ensaio: _____  |              | Código de Ensaio: _____                  |                                   |               |   |                   |                       | Status do ensaio: <u>N/A</u> |                     |                      |                        |
| Ensaio nº: <u>DR-2468/21</u>  |              | Máquina: <u>MFR-2854</u>                 |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
| Programa de teste: _____  |              | Método de ensaio: <u>NBR 5520 - 1991</u> |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
| Material: _____   |              | Versão nº: _____                         |                                   | Lote: _____   |   | Projeto: _____    |                       |                              |                     |                      |                        |
| OP/EXP: _____   |              | Referência: _____                        |                                   | OP/EXP: _____ |   | Referência: _____ |                       |                              |                     |                      |                        |
| <b>Medições</b>   |              |  |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
| Id. Amostra   | Dureza Gogan |  |                                   |               |   |                   |                       |                              | Média da peça       | DesvPad              | Informações adicionais |
|   | GC           |  |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
|   | 1            | 2  | 3                                 | 4             | 5 | 6                 |                       |                              |                     |                      |                        |
| 1987/21-4   | 29           | 30                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 30                           | 1                   | Geometria da amostra |                        |
| 1987/21-6   | 29           | 30                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 30                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-17  | 30           | 39                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 35                           | 6                   | Diâmetro da amostra  |                        |
| 1987/21-16  | 30           | 30                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 30                           | 0                   | _____ mm             |                        |
| 1987/21-22  | 27           | 27                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 27                           | 0                   | Tipo de indetador    |                        |
| 1987/21-11  | 28           | 28                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 28                           | 0                   | -                    |                        |
| 1987/21-19  | 28           | 28                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 28                           | 0                   |                      |                        |
| 1987/21-25  | 26           | 28                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 27                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-27  | 28           | 27                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 28                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-20  | 29           | 31                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 30                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-7   | 27           | 28                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 28                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-15  | 26           | 27                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 27                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-8   | 31           | 35                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 33                           | 3                   |                      |                        |
| 1987/21-2   | 26           | 28                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 27                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-23  | 28           | 29                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 29                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-29  | 30           | 31                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 31                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-1   | 27           | 29                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 28                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-18  | 30           | 31                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 31                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-26  | 30           | 29                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 30                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-12  | 30           | 30                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 30                           | 0                   |                      |                        |
| 1987/21-13  | 30           | 29                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 30                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-10  | 25           | 26                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 26                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-5   | 27           | 28                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 28                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-28  | 27           | 29                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 28                           | 1                   |                      |                        |
| 1987/21-21  | 28           | 29                                       | -                                 | -             | - | -                 |                       | 29                           | 1                   |                      |                        |
| Média da amostragem   |              |  |                                   |               |   |                   |                       | 29                           |                     |                      |                        |
| Mínimo  |              |  |                                   |               |   |                   |                       | 25                           |                     |                      |                        |
| Máximo  |              |  |                                   |               |   |                   |                       | 39                           |                     |                      |                        |
| Desvio padrão da amostragem   |              |  |                                   |               |   |                   |                       | 2                            |                     |                      |                        |
| <b>Observações</b>  |              |  |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
| PECAS lado B  |              |  |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
| <b>Responsável</b>  |              |  |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
| Técnico de Ensaio: <u>Adriano Mario</u>   |              |  | Verificado por: <u>José Kloss</u> |               |   |                   | Data: <u>15/04/21</u> |                              |                     |                      |                        |
| LABORATÓRIO FÍSICO - FRAS-LE S.A. - RS 122, Km 66, nº 10945 - Forqueta - CEP: 95115-550 - Caxias do Sul - RS - Brasil - Tel: (+55 54) 3239.1000 |              |  |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |
| Pg. 1 / 1   |              |  |                                   |               |   |                   |                       |                              |                     |                      |                        |

Fonte: (O autor)

Tabela 27 – Resultados das leituras realizadas sobre as pastilhas do Grupo 2, no lado B.

|  |                                   |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
|--|-----------------------------------|--|------------------------------|---|-----------------------------------|---|---------------|-----------------------|------------------------|--|
|   | <b>LABORATÓRIO FÍSICO - SIDEP</b> |  | Mod: 0241 Edição: C          |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
|  | Resultado de Ensaio de Dureza     |  | Emissão: 22/05/14            |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
|  |                                   |  | Revisão: 31/05/19            |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| Solicitação de ensaio: _____   |                                   | Código de Ensaio: _____                  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| Ensaio nº: <u>DR-2468/21</u>   |                                   | Máquina: <u>MFR-2854</u>                 | Status do ensaio: <u>N/A</u> |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| Programa de teste: _____   |                                   | Método de ensaio: <u>NBR 5520 - 1991</u> |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| Material: _____  |                                   | Versão nº: _____                         | Lote: _____                  |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| OP/EXP: _____  |                                   | Referência: _____                        | OP/EXP: _____                |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
|  |                                   | Referência: _____                        |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| <b>Medições</b>  |                                   |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| Id. Amostra  | Dureza Gogan                      |  |                              |   |                                   |   |               |                       | Informações adicionais |  |
|  | GC                                |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
|  | 1                                 | 2  | 3                            | 4 | 5                                 | 6 | Média da peça | DesvPad               | Geometria da amostra   |  |
| 1987/21-6  | 40                                | 46                                       | -                            | - | -                                 | - | 43            | 4                     |                        |  |
| 1987/21-5  | 26                                | 39                                       | -                            | - | -                                 | - | 33            | 9                     |                        |  |
| 1987/21-27   | 29                                | 29                                       | -                            | - | -                                 | - | 29            | 0                     | Diâmetro da amostra    |  |
| 1987/21-2  | 27                                | 27                                       | -                            | - | -                                 | - | 27            | 0                     | _____ mm               |  |
| 1987/21-13   | 58                                | 60                                       | -                            | - | -                                 | - | 59            | 1                     |                        |  |
| 1987/21-22   | 43                                | 64                                       | -                            | - | -                                 | - | 54            | 15                    | Tipo de indentador     |  |
| 1987/21-11   | 29                                | 30                                       | -                            | - | -                                 | - | 30            | 1                     | -                      |  |
| 1987/21-19   | 32                                | 28                                       | -                            | - | -                                 | - | 30            | 3                     |                        |  |
| 1987/21-23   | 27                                | 30                                       | -                            | - | -                                 | - | 29            | 2                     |                        |  |
| 1987/21-17   | 30                                | 32                                       | -                            | - | -                                 | - | 31            | 1                     |                        |  |
| 1987/21-26   | 32                                | 38                                       | -                            | - | -                                 | - | 35            | 4                     |                        |  |
| 1987/21-18   | 32                                | 34                                       | -                            | - | -                                 | - | 33            | 1                     |                        |  |
| 1987/21-28   | 30                                | 30                                       | -                            | - | -                                 | - | 30            | 0                     |                        |  |
| 1987/21-8  | 27                                | 27                                       | -                            | - | -                                 | - | 27            | 0                     |                        |  |
| 1987/21-25   | 28                                | 29                                       | -                            | - | -                                 | - | 29            | 1                     |                        |  |
| 1987/21-10   | 28                                | 29                                       | -                            | - | -                                 | - | 29            | 1                     |                        |  |
| 1987/21-4  | 33                                | 44                                       | -                            | - | -                                 | - | 39            | 8                     |                        |  |
| 1987/21-16   | 52                                | 61                                       | -                            | - | -                                 | - | 57            | 6                     |                        |  |
| 1987/21-1  | 36                                | 44                                       | -                            | - | -                                 | - | 40            | 6                     |                        |  |
| 1987/21-7  | 26                                | 28                                       | -                            | - | -                                 | - | 27            | 1                     |                        |  |
| 1987/21-21   | 26                                | 24                                       | -                            | - | -                                 | - | 25            | 1                     |                        |  |
| 1987/21-15   | 35                                | 48                                       | -                            | - | -                                 | - | 42            | 9                     |                        |  |
| 1987/21-29   | 48                                | 54                                       | -                            | - | -                                 | - | 51            | 4                     |                        |  |
| 1987/21-12   | 59                                | 116                                      | -                            | - | -                                 | - | 88            | 40                    |                        |  |
| 1987/21-20   | 36                                | 43                                       | -                            | - | -                                 | - | 40            | 5                     |                        |  |
|  | Média da amostragem               |  |                              |   |                                   |   |               | 38                    |                        |  |
|  | Mínimo                            |  |                              |   |                                   |   |               | 24                    |                        |  |
|  | Máximo                            |  |                              |   |                                   |   |               | 116                   |                        |  |
|  | Desvio padrão da amostragem       |  |                              |   |                                   |   |               | 16                    |                        |  |
| <b>Observações</b>   |                                   |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| PEÇAS LADO A   |                                   |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| <b>Responsável</b>   |                                   |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| Técnico de Ensaio: <u>José Kloss</u>   |                                   |  |                              |   | Verificado por: <u>José Kloss</u> |   |               | Data: <u>15/04/21</u> |                        |  |
| LABORATÓRIO FÍSICO - FRAS-LE S.A - RS 122, Km 66, nº 10945 - Forqueta - CEP. 95115-550 - Caxias do Sul - RS - Brasil - Tel: (+55 54) 3239.1000 |                                   |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |
| Pg. 1 / 1  |                                   |  |                              |   |                                   |   |               |                       |                        |  |

Fonte: (O autor)