

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DO SISTEMA E DO MATERIAL DE ATRITO SOBRE O CURSO
(*STROKE*) DO ATUADOR PNEUMÁTICO DE UM FREIO A DISCO POR
ACIONAMENTO A AR

por

Roger Lusa dos Santos

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 06 de Outubro de 2022.

INFLUÊNCIA DO SISTEMA E DO MATERIAL DE ATRITO SOBRE O CURSO
(*STROKE*) DO ATUADOR PNEUMÁTICO DE UM FREIO A DISCO POR
ACIONAMENTO A AR

por

Roger Lusa dos Santos
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira, PROMEC / UFRGS

Dr. Luciano Tedesco Matoso, Gerente de engenharia na FRAS-LE

Dr. Vagner do Nascimento, Eng. de CAE no Centro Tecnológico Randon (CTR)

Prof. Dr. Felipe Centeno
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 06 de Outubro de 2022

“Todo mundo fala em não perder tempo, acelerar e tocar em frente, porém, antes de tudo isso, vale a pena pisar no freio refletir e organizar muito bem a sua jornada.”

Roger Lusa dos Santos

Dedico esse trabalho a todos que direta ou indiretamente contribuíram para tornar possível a realização deste trabalho. MUITO OBRIGADO!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por permitir-me realizar esse excelente curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, assim como pela oportunidade de realizar esse trabalho juntamente com uma equipe de profissionais extremamente qualificados!

Aproveito para agradecer a toda minha família, em especial a minha mãe (Jucelita) e meu pai (Faissar) que sempre me suportaram e incentivaram a seguir em frente, superando as dificuldades e desafios. Aproveito para agradecer a minha esposa e companheira (Caroline), pelo habitual apoio e paciência, ao meu filho (Bernardo), que sempre que possível alegrava o ambiente de estudos e permitia um momento de descontração entre uma brincadeira e outra.

Agradeço, também, ao Laboratório de Tribologia (Latrib) da UFRGS, à Empresa Fras-le S. A. e aos seus qualificados profissionais pelo apoio e parceria no desenvolvimento desse estudo. Com agradecimento especial aos excelentes profissionais que me ajudaram incontáveis vezes: professor e orientador Patric Neis, professor Ney Ferreira, colegas de trabalho que tiveram grande participação no desenvolvimento deste trabalho: Luciano Matozo, Mateus Garbuio, Ricardo Lamb, Natalia Lorandi, Luiz Rafael, Luciano Maia, Diego Severo, Juliana Favero, Mauricio Lazzari, Rafael Pains, Diovane, Everton Amaral e Thaysa Luza.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e incentivo na realização desse trabalho.

RESUMO

A capacidade de frenagem em reduzir a velocidade ou mesmo manter o veículo parado é extremamente importante no projeto de qualquer sistema de freio, pois mais do que atender às exigências da legislação, afeta diretamente a operação segura do veículo e seus usuários. Um componente fundamental, que requer atenção, é o material de atrito, que se destina a estabelecer um compromisso entre propriedades mecânicas, coeficiente de atrito, propensão a ruídos, deformação, desgaste, entre outros. No entanto, a capacidade de frenagem é uma resposta combinada de várias dessas propriedades do material de atrito, juntamente com o desempenho de outros componentes do sistema de freio, como a câmara de freio, disco e calíper. Este trabalho tem como objetivo investigar a influência do efeito da velocidade, temperatura, flexibilidade abaixo da superfície, desgaste irregular e parcial do material de atrito sobre a variação do curso da haste da câmara de freio (*stroke*) de um modelo de freio a disco com acionamento a ar (*Air Disc Brake – ADB*) da linha pesada quando submetido à condição de operação dinâmica do freio, ou seja, com o giro do disco de freio. Para isso, serão consideradas duas formulações distintas (A e C) e uma única geometria de pastilha (PD/196) específica para esse modelo de ADB. Dois procedimentos de testes foram executados em dinamômetro: (i) procedimento para avaliação do *free stroke* e flexibilidade do calíper/pastilha e (ii) ensaio dinâmico, com uma rotina de etapas em velocidades de 60 e 100 km/h e temperaturas variando de 100 °C a 600 °C. Estes procedimentos foram organizados em 03 grupos de ensaios. Cada grupo de ensaio é responsável por responder por alguns dos 06 objetivos específicos deste trabalho. Verificou-se que, individualmente, algumas características das formulações podem afetar no comportamento do *stroke*, no entanto, ao final do trabalho, a combinação de uma formulação do tipo A com características específicas de baixa compressibilidade a frio, níveis de desgastes parciais elevados, desgaste irregular elevado, tendem, apesar da baixa flexibilidade (maior rigidez) do *bulk* da formulação A, a comprometer o funcionamento adequado do mecanismo de ajuste do freio, provocando um aumento nos níveis de *stroke* dinâmico ao longo do ensaio. Analogamente, em veículo, esse acréscimo de *stroke* pode até mesmo ser percebida pelo motorista em função do aumento de curso do pedal de freio.

Palavras-chave: Curso da haste da câmara de freio (*stroke*); Freio a disco, Material de atrito.

ABSTRACT

The braking capacity of reducing the speed or even keeping the vehicle stopped is extremely important in the design of any brake system, as more than meeting legislation requirements; it directly affects the safe operation of the vehicle and its users. A fundamental component, which requires attention, is the friction material, which is designed to establish a compromise between mechanical properties, friction coefficient, noise propensity, deformation, wear, among others. However, braking capacity is a combined response for several of these friction material properties, along with the performance of other brake system components, such as the brake chamber, disc and caliper. This work aims to investigate the influence of the effect of speed, temperature, flexibility below the surface, irregular and partial wear of the friction material on the variation of the air brake push rod travel (stroke) of an Air Disc Brake (ADB) of the heavy line when subjected to the dynamic operating condition of the brake, that is, with the rotation of the brake disc. For this, two different formulations (A and C) and a single brake pad geometry (PD/196) specific to this ADB model will be considered. Two test procedures were performed on a dynamometer: (i) procedure for evaluating the free stroke and brake pad/caliper flexibility and (ii) dynamic test, with a routine of steps at speeds of 60 and 100 km/h and temperatures ranging from 100 °C to 600°C. These procedures were organized in 03 test groups. Each test group is responsible for responding to some of the 06 specific objectives of this work. As a result, it was verified that individually, some characteristics of the formulations can affect the behavior of the stroke, however, at the end of the work, the combination of a type A formulation with specific characteristics of low cold compressibility, high levels of partial wear, high irregular wear, tend, despite the low flexibility (greater rigidity) of the bulk of formulation A, to compromise the proper functioning of the brake adjustment mechanism, causing an increase in the levels of dynamic stroke throughout the test. Similarly, in a vehicle, this increase in stroke can even be perceived by the driver as a result of the increase in the travel of the brake pedal.

Keywords: Air brake push rod travel (stroke); Disc brakes; Friction material.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	4
1.1.1	Objetivo Geral.....	4
1.1.2	Objetivos Específicos.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Sistema de Freio.....	6
2.1.1	Mecanismo de ajuste do ADB.....	14
2.1.2	Tempo para acionamento e consumo do <i>running clearance</i> ou <i>free stroke</i> 18	
2.1.3	Expansão térmica dos materiais sólidos.....	19
2.1.4	Energia de frenagem e a temperatura das pastilhas e disco.....	20
2.1.5	Desgaste do material de atrito e do disco.....	23
2.2	Pastilha de freio e o material de atrito.....	26
2.2.1	Atrito.....	26
2.2.2	Material de Atrito.....	27
2.2.3	Processo de manufatura das pastilhas de freio.....	29
2.3	Dinamômetro Inercial.....	30
2.4	Influência da deformação da pastilha e sistema sobre o <i>stroke</i> (Análises Estáticas).....	31
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Medição do curso da câmara de freio (<i>stroke</i>) e instalação do ADB ..	33
3.2	Modelo de freio a disco utilizado.....	34
3.3	Amostras utilizados nas análises.....	35
3.4	Métodos de Análise.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1	Efeito do desgaste irregular da pastilha sobre o <i>stroke</i> (objetivo 5)	48
4.2	Efeito do início e fim de vida da pastilha sobre o <i>stroke</i> (objetivo 6)...	54
4.3	Relação de contribuição do efeito de <i>bulk</i> e superfície (objetivo 4)	56
4.4	Efeito dinâmico sobre o <i>free stroke</i> e flexibilidade (objetivo 3)	60

4.4.1	Avaliação da velocidade de 60 km/h	60
4.4.2	Avaliação da velocidade de 100 km/h	62
4.5	Efeito da velocidade e temperatura sobre o <i>stroke</i> (objetivo 1 e 2).....	66
4.6	Curva do <i>stroke</i> - A2 vs D (objetivo 3 – Análise complementar)	71
5	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	APÊNDICE A.....	87
	APÊNDICE B.....	89
	APÊNDICE C.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de acionamento de freios a disco: <i>floating disc brake caliper</i> [Fonte: Adaptado de Mathworks, 2022].	8
Figura 2.2 – Principais componentes do freio à disco. Vista isométrica [Fonte: o autor – adaptado de Sharpbrake, 2021 e Meritor, 2015]	8
Figura 2.3 – Vista em corte mostrando os principais componentes do ADB. [Fonte: o autor – Adaptado de Bendix, 2014 e Kraftfahrt-Bundesamt, 2015]	10
Figura 2.4 – Curso da câmara de freio (<i>stroke</i>). [Fonte: Adaptado de Meritor, 2016]	12
Figura 2.5 – Curvas de força de acionamento da câmara de freio pelo deslocamento da haste da câmara (<i>stroke</i>) para câmara do tipo <i>standard</i> e <i>long stroke</i> [Fonte: Adaptado de MGM Brakes, 2018]	14
Figura 2.6 – Mecanismo de ajuste de freios Meritor – ELSA 225 [Fonte: o autor, adaptado de MERITOR, 2016.]	16
Figura 2.7 – (a) Acionamento de freio a 60km/h @ 100°C: curvas de torque de frenagem (Nm), pressão de acionamento (bar), <i>stroke</i> (mm), velocidade (km/h) contra o tempo (s) em dinamômetro; (b) ampliação na região A: análise da curva de <i>stroke</i> – linha rosa (mm) e da curva de torque de frenagem – linha azul (Nm) [Dados cedidos pela Fras-le S/A]	19
Figura 2.8 – Representação das variáveis cinéticas e potenciais em uma pista inclinada [Fonte: Limpert, 2011]	21
Figura 2.9 - Representação da distribuição de temperatura em um sistema de freio a disco [Fonte: Pavlak, 2021, adaptado de: Lee, 1999].	21
Figura 2.10 – Distribuição da temperatura em freio a disco de roda 22,5”. Na esquerda dados obtidos em elementos finitos e na direita dados experimentais. [Fonte: Relatório Técnico - SIDEP 1178-21]	22
Figura 2.11 – Desgaste máximo das pastilhas de freio [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019]	24
Figura 2.12 – Desgaste oblíquo no sentido tangencial [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019]	24

Figura 2.13 – Desgaste irregular no sentido radial [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019].....	25
Figura 2.14 – Desgaste máximo do disco [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019].....	25
Figura 2.15 – Exemplo de um modelo de pastilha de freios usadas em ADB [Fonte: O autor].	29
Figura 2.16 – Fluxograma do processo de fabricação de pastilhas de freio usadas em ADB [Fonte: O autor].	30
Figura 2.17 – Esquema de dinamômetro inercial [Fonte: adaptado de Haynes, 1999 apud Neis, 2012].	31
Figura 3.1 – Dispositivo de medição do curso da câmara de Freio [Fonte: o autor].....	33
Figura 3.2 – Disposição dos aparatos de medição e instalação do freio no dinamômetro [Fonte: o autor].	34
Figura 3.3 – Detalhamento das geometrias das amostras usadas nas análises. [Fonte: o autor]	37
Figura 3.4 – Descrição das amostras, posição dos calípers de folga, tipo de desgaste irregular simulado e imagem do freio com as amostras D1, D2 e D3. [Fonte: o autor]	38
Figura 3.5 – Disposição dos 8 pontos de medição para inspeção das pastilhas. Fonte: o autor	42
Figura 3.6 – Grupos de ensaios e os respectivos objetivos específicos avaliados. Fonte: o autor	43
Figura 3.7 – Fluxograma do grupo de ensaios 1. [Fonte: o autor]	44
Figura 3.8 – Fluxograma do grupo de ensaios 2. [Fonte: o autor]	45
Figura 3.9 – Fluxograma do grupo de ensaios 3. [Fonte: o autor]	47
Figura 4.1 – Resultados de PAFF G1.1 para as pastilhas D, D1, D2 e D3	49
Figura 4.2 – Resultados de PAFF G1.1 de flexibilidade do sistema a 2 e 8 bar e de <i>free stroke</i> a 0,6 bar para pastilhas D, D1, D2 e D3	49
Figura 4.3 – a) condição de repouso do freio, b) momento em que ocorre o contato do pistão na amostra D1 e início de torção do calíper, c) forte torção do calíper e acomodação do sistema, d) detalhamento do momento do contato de um dos pistões antes que o outro .	51
Figura 4.4 – Momento em que ocorre o toque do pistão na amostra D3 e torção do calíper. .	52
Figura 4.5 – Resultados de PAFF G1.2 para o sistema em início (D) e fim de vida (E)	55

Figura 4.6 – Resultados de PAFF G1.2 de flexibilidade do sistema a 2 e 8 bar e de <i>free stroke</i> a 0,6 bar para o sistema em início de vida (D) e fim de vida (E).	55
Figura 4.7 – PAFF G3 do Grupo 3 a 60 km/h (C3 e C7) – Inicial e final	56
Figura 4.8 – Relação entre os resultados do PAFF G3 e das inspeções a 60 km/h (C3 e C7) .	57
Figura 4.9 – PAFF G2 - Grupo 2 a 60 km/h (C8 e A1) – Inicial e final	60
Figura 4.10 – Relação entre os resultados do PAFF G2 e das inspeções a 60 km/h (C8 e A1)	61
Figura 4.11 – Perfil de desgaste das pastilhas após ensaios do G2 a 60 km/h	62
Figura 4.12 – PAFF do Grupo 2 a 100 km/h (C9 e A2) – Inicial e final.....	63
Figura 4.13 – Relação do desgaste irregular com o <i>free stroke</i> a 100 km/h.....	64
Figura 4.14 – Perfil de desgaste das pastilhas após ensaios do G2 a 100 km/h	65
Figura 4.15 – <i>Stroke</i> dinâmico a 2 bar e 8 bar a 60 km/h (Amostra A1 e C8) e 100 km/h (Amostra A2 e C9)	67
Figura 4.16 – <i>Stroke</i> @ 1bar a 60 km/h (Amostra A1 e C8) e 100 km/h (Amostra A2 e C9) .	68
Figura 4.17 – <i>Free stroke</i> dinâmico de 100 a 600°C a 100 km/h para as amostras A2 e C9 ...	69
Figura 4.18 – <i>Stroke</i> dinâmico ajustado @ 2 e 8 bar @ 60 km/h (Amostra A2 e C9)	69
Figura 4.19 – Diferença de <i>stroke</i> entre 400°C e 100°C vs pressão - 60 km/h (Amostra A1 e C8) e 100 km/h (Amostra A2 e C9)	70
Figura 4.20 – PAFF G2 amostra A2 (inicial e final) versus PAFF G1 amostra D.....	71
Figura 4.21 – Dados instantâneos do acionamento do (a) Ponto 1, (b) Ponto 2 e (c) Ponto 3.	72
Figura 4.22 – Detalhamento das métricas durante o acionamento do ponto 2 – 0,6 bar.....	74
Figura 4.23 – Detalhamento das métricas durante o acionamento do ponto 1 – 2 bar.....	75
Figura 4.24 – Detalhamento das métricas durante o acionamento do ponto 3 – 8 bar.....	76
Figura 4.25 – Detalhamento das Métricas durante o acionamento do Ponto 3 – 8 bar	76
Figura A.1 – Fluxograma do método de ensaios proposto por Santos et al, 2021. [Fonte: o autor].....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Detalhamento e descrição dos componentes de um ADB.....	9
Tabela 3.1 – Descrição do freio e geometria de pastilha avaliada	34
Tabela 3.2 – Composição do Material A e C	35
Tabela 3.3 – Detalhes das compressibilidades das amostras.....	36
Tabela 3.4 – Procedimento de avaliação do <i>free stroke</i> e flexibilidade (PAFF).....	39
Tabela 3.5 – Procedimento 2 – Teste dinâmico em dinamômetro – 60 km/h.....	41
Tabela 3.6 – Procedimento 2 – Teste dinâmico em dinamômetro – 100 km/h.....	41
Tabela 4.1 – Métricas extraídas através do ponto 2.	73
Tabela 4.2 – Métricas extraídas através do ponto 1.	74
Tabela 4.3 – Métricas extraídas através do ponto 3.	75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADB	Air Disc Brake
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Antilock Braking System
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CTR	Centro Tecnológico Randon
EBS	Electronic Brake System
FEA	Análise de elementos finitos
Latrib	Laboratório de Tribologia
LVDT	Linear variable differential transformer
ISSO	International Organization for Standardization
M1	Método 1
M2	Método 2
NBR	Norma Brasileira
NVH	Noise, vibration e harshness
PAFF	Procedimento de avaliação de <i>free stroke</i> e flexibilidade
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RC	Relação de contribuição
SAE	Society of Automotive Engineers
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

F_1	força de acionamento da câmara de freio, N
P_{act}	pressão de ar introduzida na câmara de freio, Pa, porém é muito usual em bar
A_{act}	área do êmbolo da câmara, m ² , porém é muito usual em pol ²
A_1	fator de alavancagem, adimensional
l_e	alavanca de entrada adimensional
e_e	alavanca de saída adimensional
F_2	força de saída no pistão – na pastilha interna, N
F'_2	força de reação na pastilha externa, N
$P_{contact}$	pressão de contato
A_{pad}	área de contato entre disco e pastilha, m ²
L	comprimento total do material, mm
T	temperatura, °C
α	expansão térmica, $m/(m \cdot ^\circ C)$ ou $[^\circ C]^{-1}$
L_f	comprimento final, m
L_0	comprimento inicial, m
T_f	temperatura final, °C
T_0	temperatura inicial, °C
ΔL	Variação do comprimento, mm
m	Massa, kg
V_1	velocidade inicial, m/s
V_2	velocidade final, m/s
I	momento de inércia dos componentes giratórios, kgm ²
w_1	velocidade angular inicial dos componentes giratórios, s ⁻¹
w_2	velocidade angular final dos componentes giratórios, s ⁻¹
W	peso do veículo, N
H	variação de altura, m
E_f	energia de frenagem, Nm
F_a	força de atrito entre as superfícies, N

μ coeficiente de atrito
 F_N força normal aplicada para manter as superfícies em contato, N

1 INTRODUÇÃO

Na indústria automotiva, o desenvolvimento de novos produtos deve estar em constante evolução. Com isso, Azevedo, 2002, comenta que existem melhorias desde as partes mecânicas, tais como no motor, visando melhora do desempenho, redução do consumo de combustível e redução na emissão de poluentes, até melhorias nos sistemas de freio, como a redução do desgaste de componentes, por exemplo. Com relação aos freios, estas melhorias são também aplicadas na linha de veículos comerciais (também conhecido por linha de veículos pesados), tais como caminhões e ônibus, onde o sistema de freio está submetido a grandes cargas, longos períodos de tempo e longas rotas, exigindo alta durabilidade das pastilhas de freio para atingir a satisfação dos clientes.

A utilização de freio a disco com acionamento pneumático, ou simplesmente *Air disc Brake* (ADB), em veículos da linha pesada vem aumentando gradativamente no Brasil, dada a grande utilização na Europa e ao crescimento gradativo no mercado da América do Norte e na Ásia. O Brasil tem a tendência de seguir o mesmo caminho da Europa, ainda que de forma mais lenta. Os custos dos freios a tambor são considerados bem menores do que o custo dos freios a disco, entretanto, os sistemas de freio a disco têm diversas vantagens em comparação com os freios a tambor, tais como: melhor eficiência de frenagem, melhor desempenho em função da temperatura, maior capacidade de dissipar energia gerada na frenagem, além de maior conforto durante o acionamento do pedal de freio [Brezolin, 2007]. Por essa razão, este trabalho irá focar o estudo sobre o sistema de freios a disco com acionamento pneumático (ADB) da linha pesada, categorias M3, N3 e O4, conforme o padrão de divisão de categorias descritas pela Portaria do Inmetro N°55/2014 e conforme as subdivisões da ABNT NBR 13776. Esses freios são utilizados em rodas com 22,5” de diâmetro.

O conforto durante o acionamento do pedal tem relação com a força e o deslocamento do pedal, os quais são fatores importantes para o motorista articular a eficiência da frenagem com segurança. De acordo com Limpert, 1999, a maciez excessiva do pedal de freio não é apenas uma condição insegura, devido à ausência de controle do veículo e ao bloqueio acidental do freio, mas também pode ampliar as distâncias de parada.

Tecnicamente, o termo conhecido como sensibilidade de pedal representa a relação entre a força aplicada no pedal, o curso do pedal e a desaceleração alcançada pelo veículo.

Normalmente, o comportamento do freio do veículo é analisado no veículo em pista de teste considerando diferentes condições de desaceleração, força e curso do pedal [Prado, 2019].

O sistema de freio a ar usado em veículos comerciais é composto por dois subsistemas: 1) O subsistema de suprimento e controle é pneumático, que inclui o compressor, os reservatórios de armazenamento, as linhas de freio, a válvula de pedal (que é acionada e modulada pelo próprio motorista através do pedal de freio) e termina no atuador pneumático (ou popularmente conhecida como câmara de freio, a qual é acionada pelo ar pressurizado em seu interior). 2) O subsistema mecânico, que começa na câmara de freio, passa pelo mecanismo do freio - cáliper (que inclui o ajustador de folga), as pastilhas de freio e disco [Subramanian, 2003]. Apesar de ambos os subsistemas influenciarem na sensação de pedal e no resultado do curso do pedal, no caso deste trabalho, o subsistema mecânico será o grande foco da análise.

Segundo Basch, 2018, diferentes características de cada sistema de freio são responsáveis pela sensação do pedal. O subsistema de suprimento pneumático é mais complexo do que o sistema de suprimento hidráulico (muito aplicado em automóveis) e, por consequência disso, a sensação de pedal é prejudicada, e pouco *feedback* sensorial é disponibilizada ao motorista [Subramanian, 2003]. Por outro lado, o design do cáliper e o material da pastilha de freio também possuem grande influência sobre a sensibilidade do pedal, independentemente da fonte de suprimento pneumática ou hidráulica. Estudos com freios a disco hidráulicos mostram que existe uma grande influência da deformação do cáliper do freio sobre o curso do pistão do freio, o qual está associado com o volume de fluido de freio deslocado [Antunes, 2019]. Da mesma forma, estudos em ADB mostram que o cáliper tem grande influência sobre o curso de pistão, o qual está associado com o curso da haste da câmara de freio (curso este conhecido pelo nome de *stroke*) [Santos et al, 2021]. As propriedades como o nível de fricção, taxa de crescimento do nível de atrito no momento da parada, a compressibilidade a frio e a quente são algumas das características dos materiais de fricção que podem influenciar a sensação do pedal [Basch, 2018].

Além disso, ao longo da utilização do freio, ocorre o desgaste do material de atrito e do rotor de freio, acarretando no aumento da folga entre esses componentes, que causa aumento do curso morto do pedal de freio do veículo. Curso morto é definido como o deslocamento de pedal que não resulta em nenhuma força efetiva de frenagem [Magioni et al, 2015]. No ADB, esse curso que não gera força efetiva de frenagem é conhecido por curso livre da câmara de

freio (*free stroke*), que basicamente é a folga entre a pastilha e disco. Para compensar isso, existe o ajustador automático, que tem a função de manter a folga ideal entre o material de atrito e o rotor, prevenindo elevados cursos da haste da câmara de freio (*stroke*) e a perda de desempenho, bem como um sentimento de pedal exageradamente esponjoso. No ADB, o sistema é desenvolvido para atender tanto as condições a frio, quanto condições a quente, onde disco e material de atrito dilatam, reduzindo a folga entre eles. Com isso a haste da câmara de freio fica mais longe de chegar ao fim de curso e isso garante um bom desempenho do sistema sem torque residual [Reilly, 2019].

Durante o projeto de um sistema de freio e do respectivo material de atrito, muitos fatores devem ser analisados e as exigências impostas pelas normas regulamentadoras de segurança devem ser asseguradas durante todo o processo [Santos et al, 2011]. Assim, o material de fricção precisa ser desenvolvido visando estabelecer uma relação de compromisso entre propriedades mecânicas, coeficiente de atrito adequado e estável, propensão ao ruído, deformação, desgaste, entre outros. A capacidade de frenagem em reduzir a velocidade ou mesmo manter o veículo parado é a resposta da combinação de várias propriedades do material de atrito, juntamente com o desempenho de outros componentes do sistema de freio, tais como câmara de freio, disco e cáliper. Um curso de câmara adequado certamente torna o sistema mais eficiente e transmite mais segurança ao motorista [Santos et al, 2021].

Segundo Prado, 2019, através do *feeling* de pedal, o motorista é capaz de observar muito mais sobre o *status* do sistema de freio (por exemplo: um freio bem ou mal regulado e um ideal ou elevado nível de *stroke*) do que a percepção de distância de parada do veículo. Por essa razão a análise da deformação do sistema de freios e do material de atrito e sua influência sobre o *stroke* se torna algo bastante relevante, visto que trata-se de uma relação direta com a força de pedal (ergonomia do motorista), força de acionamento da câmara e por fim força e torque de frenagem.

Santos e at, 2021, ainda comentam que o engenheiro precisa estar atento para avaliar cada um dos fatores que influenciam sobre o *Stroke* em um ADB, e por essa razão, através do acionamento do ADB de forma estática (sem o giro do disco de freio), os autores avaliaram alguns fatores que influenciam o valor de *Stroke* (tais como: a formulação, a compressibilidade do material de atrito, a rigidez do sistema de ADB, o efeito da temperatura e a utilização de chanfros em pastilhas), bem como as relações de contribuição do material de atrito a frio e quente e do sistema de freio sobre o *Stroke*.

Desta forma, este trabalho visa complementar o trabalho iniciado por Santos et al, 2021, com o objetivo de avaliar o comportamento do *Stroke* em função da combinação de diversos efeitos quando em uma condição dinâmica, ou seja, com o giro do disco de freio. A compreensão desses efeitos sobre o *stroke* ajuda os engenheiros de aplicação e os engenheiros químicos de desenvolvimento a definir a melhor formulação capaz de gerar um *stroke* mais ajustado para cada aplicação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é de investigar a influência do efeito da velocidade linear (km/h), temperatura no par de atrito (pastilha e disco), flexibilidade abaixo da superfície, desgaste parcial e irregular da superfície do material de atrito sobre a variação do curso da haste da câmara de freio (*stroke*) de um modelo de ADB da linha pesada quando submetido à condição de operação dinâmica do freio, ou seja, com o giro do disco de freio. Para isso, serão consideradas duas formulações distintas e uma única geometria de pastilha específica para esse modelo de ADB, divididos em 03 grupos de ensaios em dinamômetro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Para as duas formulações distintas, avaliar a influência dos efeitos dinâmicos (listados abaixo) sobre o *stroke*, por meio de um procedimento específico de ensaio em dinamômetro:
 1. Efeito de diferentes velocidades (60 km/h e 100 km/h);
 2. Efeito do aumento da temperatura durante o ensaio (100 e 400°C);
 3. Efeito do desgaste irregular da superfície do material de atrito sobre o curso livre do freio (*free stroke* – folga entre pastilha e disco) e variação da flexibilidade da estrutura do material de atrito abaixo da superfície (*bulk*);
 4. Relação de contribuição (%) do efeito do desgaste irregular da superfície e do efeito da variação da flexibilidade da estrutura do material de atrito abaixo da superfície (*bulk*);

- ✓ Com o objetivo de explicar alguns dos efeitos dinâmicos (acima listados), avaliações complementares (sem giro do disco) serão realizadas com o uso de blocos de aço (para não haver a influência do material de atrito) e com pastilhas de material compósito:
- 5. Efeito de 03 tipos de desgaste irregular (simuladas com blocos de aço e um dos tipos de desgastes com pastilha de material compósito) sobre o curso livre do freio (*free stroke* – folga entre blocos de aço e disco) e flexibilidade do sistema;
- 6. Efeito de início e fim de vida da pastilha (simuladas com blocos de aço) sobre o curso livre do freio (*free stroke* – folga entre blocos de aço e disco) e flexibilidade do sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui, nesse capítulo, será brevemente revisado o sistema de freio a disco por acionamento pneumático (ADB), seus componentes e mecanismos de ajuste. Para melhor compreensão dos esforços, cálculos de torque e força de frenagem são apresentados. Conceitos de transformação de energia cinética em térmica também são apresentados, visto que um dos grandes efeitos de deformação do material de atrito é causado pelo aumento da temperatura. Será explorado o método de medição e definição de compressibilidade de material de atrito, além do conceito da expansão térmica. Também o atrito, material de atrito e processo de manufatura de pastilhas de freios são apresentados. Por fim, baseado em trabalho anterior de Santos et al, 2021, fatores que influenciam no curso da câmara de freio (*stroke*) em um ADB (análise estática, sem giro do disco) são apresentados, bem como o efeito da combinação desses fatores sobre o mecanismo de ajuste do freio.

2.1 Sistema de Freio

Os sistemas de freio são mecanismos utilizados para reduzir a velocidade, extinguir ou evitar o movimento de um corpo, transformando a energia cinética do veículo em movimento para energia térmica, ou ainda, manter a energia potencial do veículo estacionado, por meio da interação entre o material de atrito e o rotor desse sistema de freio. A dissipação da energia cinética do veículo ocorre através da energia térmica e energia acústica, provocando os fenômenos de ruído do sistema de freio [Limpert, 1999].

Limpert, 1999, comenta que os primeiros sistemas de freios eram sistemas arcaicos, acionados por alavancas, pressionando blocos de madeira ou ainda cintas de couro sobre tambores. O desgaste desses componentes eram excessivos. Com o passar do tempo, o surgimento do freio a tambor com sapatas internas com acionamento por alavanca, e a seguir com acionamento hidráulico, possibilitou o aumento da força de acionamento do freio e consecutiva redução de esforço do motorista.

Segundo Iombriller, 2002, vem se tornando cada vez mais comum a utilização de freios a disco em veículos comerciais, substituindo os freios a tambor. Isto se deve principalmente à

busca de maior eficiência de frenagem, assim como a menor ocorrência do fenômeno de *fade* (perda de atrito por temperatura), já que os freios a disco são capazes de suportar temperaturas superiores aos freios a tambor. Ainda assim, Iombriler, 2002, comenta que a troca de um sistema a tambor pelo sistema a disco pode não ser suficiente para melhorar a segurança veicular, pois uma análise do sistema como um todo é muito importante. Da mesma forma, Limpert, 1999 comenta que o freio é um dos sistemas de segurança mais importantes para evitar acidentes veiculares, já que tem a função de manter o veículo estacionado, reduzir a velocidade do veículo em movimento e manter a velocidade do veículo constante em um declive.

Os sistemas de freios aplicados na linha de veículos comerciais equipado com ADB são classificados como [Limpert, 1999]:

- Freios de serviço, que são usados para frenagens normais durante a rodagem do veículo;
- Freios secundários ou de emergência são utilizados quando ocorre uma eventual falha no sistema de freio de serviço; e
- Freio de estacionamento que é utilizado para manter o veículo estacionado

O sistema de freio a disco pode ser classificado quanto ao tipo de cáliper entre fixo ou flutuante. No caso dos freios a disco acionados pneumáticamente (ADB), aplicados na linha comercial pesada e foco no presente estudo, o tipo de cáliper é flutuante. Esse cáliper é montado sobre o cavalete, que é fixado sobre o eixo. Assim, o cáliper se movimenta sobre guias e a força é aplicada pelos pistões na pastilha interna, gerando uma força de reação que desloca todo o cáliper até pressionar a pastilha externa contra o disco [Limpert, 1999]. A Figura 2.1 apresenta um desenho esquemático de um cáliper flutuante. Em geral, o cáliper é definido como o conjunto que contém os pistões e as pastilhas de freio, o qual é submetido a uma carga mecânica significativa, com requisitos de projeto particularmente rigorosos no que diz respeito às tensões, deflexões, geometria de instalação, NVH (ruído, vibração e aspereza), e os aspectos térmicos [Tirovic et al, 2011].

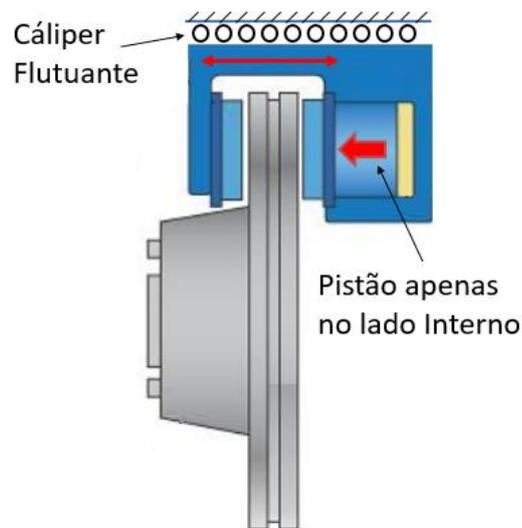


Figura 2.1 – Esquema de acionamento de freios a disco: *floating disc brake caliper* [Fonte: Adaptado de Mathworks, 2022].

O ADB apresenta um conjunto de oito componentes, sendo esses detalhados na Tabela 2.1 na Figura 2.2, o qual apresenta a vista isométrica com os principais componentes.

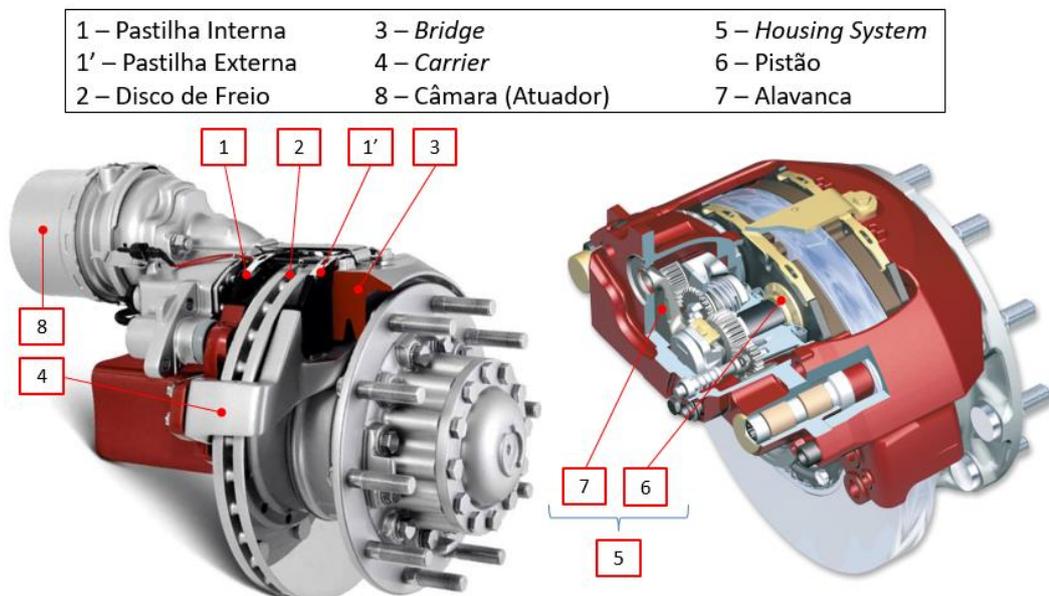


Figura 2.2 – Principais componentes do freio à disco. Vista isométrica [Fonte: o autor – adaptado de Sharpbrake, 2021 e Meritor, 2015]

Tabela 2.1 – Detalhamento e descrição dos componentes de um ADB.

Item	Nome do Item	Descrição
1 e 1'	Pastilha de Freio	Pastilha do lado interno (lado do pistão do freio) e externo, respectivamente.
2	Disco / Rotor de Freio	Componente que é solidário à roda do veículo e geralmente fabricado em ferro fundido cinzento.
3	<i>Bridge</i>	Componente em ferro fundido nodular responsável por guiar a pastilha externa (Item 1') (<i>outboard</i>), fazer a união com o <i>housing</i> (Item 5) no lado interno (<i>inboard</i>) e deslizar sobre o <i>carrier</i> (Item 4) representando a função flutuante.
4	<i>Carrier</i>	Componente responsável por suportar e fixar o sistema de freio ao eixo
5	<i>Housing system</i>	Componente que contém os pistões (Item 6) e alavanca de amplificação de força (Item 7). Além disso, dentro do <i>housing system</i> encontra-se o mecanismo de ajuste responsável pela regulagem automática do ADB, também conhecido por auto-ajuste .
6	Pistões de atuação	Componentes que são responsáveis por transmitir a força amplificada pela alavanca para a pastilha primária (Item 1). Esse modelo de freio que será utilizado no trabalho possui 2 pistões.
7	Alavanca	Componente que é responsável por amplificar a força vinda da haste da câmara de acionamento e transmitir aos pistões. Para cada modelo de freio a disco existe uma razão de alavancagem (<i>ratio</i>) entre a força que entra e a que sai.
8	Câmara de freio (atuador pneumático)	Componente responsável por receber o ar pressurizado vindo do sistema pneumático do veículo e transmitir a força através da relação de área do êmbolo e pressão do ar. A força é transmitida pela haste da câmara que fica presa ao êmbolo.

A vista em corte mostrada na Figura 2.3 permite uma melhor visualização da alavanca (Item 7) e pistões (Item 6) contidos dentro do *housing* (Item 5) de um ADB.

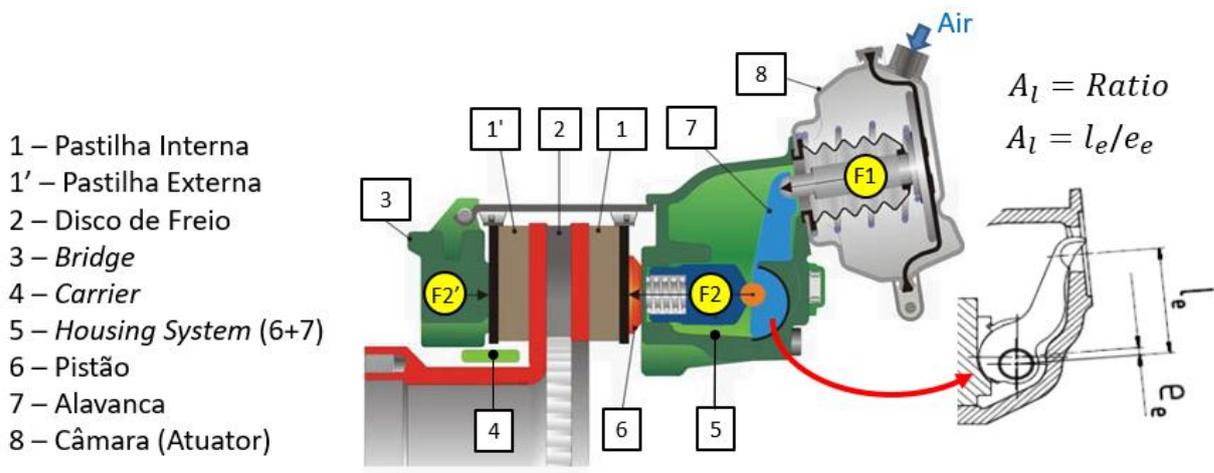


Figura 2.3 – Vista em corte mostrando os principais componentes do ADB. [Fonte: o autor – Adaptado de Bendix, 2014 e Kraftfahrt-Bundesamt, 2015]

Para calcular a força de acionamento da câmara de freio (F_1) deve-se multiplicar a pressão de ar que está sendo introduzida na câmara de freio (P_{act}) pela área correspondente ao modelo de câmara de ar em questão (Item 8 da Figura 2.3) (A_{act}), conforme a equação 2.1. Essa área da câmara é dada em polegada quadrada, referente ao tamanho do diafragma da câmara que entra em contato com o disco do êmbolo. Nesse trabalho a câmara era de 24 pol².

$$F_1 = P_{act} \cdot A_{act} \quad (2.1)$$

Onde, F_1 é a força de acionamento da câmara de freio em [N]; P_{act} é a pressão de ar na câmara de freio em [Pa]; A_{act} é a área do êmbolo da câmara em [m²].

Por se tratar de um freio a disco com aplicação pneumática, deve-se considerar a amplificação mecânica por alavanca. Quando a pressão de ar é fornecida à câmara de freio (Item 8 da Figura 2.3), a haste entra em contato com a alavanca (Item 7 da Figura 2.3) ou mecanismo semelhante, que amplifica a força pelo fator de alavancagem (A_1), que também é conhecido por “*Ratio*”. Esse fator de alavancagem (A_1) trata-se da relação entre a alavanca de entrada (l_e) pela alavanca de saída (e_e). Com isso, a força de atuação (F_2) que é aplicada na pastilha interna (Item 1 da Figura 2.3) por meio de dois pistões (Item 6 da Figura 2.3) pode ser dada pela equação 2.2 [Tirovic et al, 2011]:

$$F_2 = F_1 \cdot A_l \quad (2.2)$$

Onde, F_2 é a força de saída no pistão, em [N]; F_1 é a força de entrada no cáliper, em [N]; A_l é o fator de alavancagem, em [-].

Ainda com base na Figura 2.3, por se tratar de um Cáliper flutuante, onde o *Bridge* (Item 3) e o *Housing* (Item 5 da Figura 2.3) deslizam sobre o *Carrier* (Item 4), a F_2 e a F'_2 são iguais, e a mesma força de reação na pastilha externa (Item 1' da Figura 2.3) é obtida. Assim, a partir do acionamento do pedal de freio, a pressão de ar é estabelecida no sistema e atinge a câmara de freio, que por sua vez gera as forças F_2 e F'_2 em cada pastilha. A partir dessas forças, é possível determinar o torque frenante e o fator de freio, que não serão apresentados neste trabalho.

A pressão na superfície do material de atrito durante a aplicação, conforme apresentado na equação 2.3, é definida pela relação entre pressão de contato ($P_{contact}$), força de atuação (F_2) e área de contato entre disco e pastilha (A_{pad})

$$P_{contact} = F_2/A_{pad} \quad (2.3)$$

Onde, $P_{contact}$ é a pressão de contato, em [Pa]; F_2 é a força de atuação, em [N]; A_{pad} é a área de contato entre disco e pastilha, em [m²].

Na linha comercial do mercado nacional, existem duas marcas (modelos) predominantes de sistemas de freios ADB: os freios da marca Knorr-Bremse (Modelo SN7) e os freios da marca Meritor (Modelo ELSA 225). O primeiro é aplicado em caminhões e ônibus da montadora Mercedes-Benz do Brasil, enquanto, o segundo em caminhões e ônibus da montadora Volvo do Brasil. Um pouco mais raro, porém, pode-se encontrar semirreboques equipados com freios da Meritor e Knorr-Bremse. Em todos esses casos a são utilizadas rodas de 22,5" de diâmetro, em função da geometria, tamanhos e capacidades dos modelos de freio. A norma ABNT NBR 13776:2006 determina as categorias de veículos automotores, dividindo-as em função da capacidade de carga dos veículos. Os sistemas de ADB acima descritos podem ser encontrados em veículos da:

- Categoria M3 – Veículos projetados e construídos para o transporte de passageiros, que tenham mais do que oito assentos, além do assento do motorista, e que contenham uma massa máxima superior a 5 t.
- Categoria N3 – Veículos projetados e construídos para o transporte de cargas e que contenham uma massa máxima superior a 12 t.
- Categoria O4 – Reboques com uma massa superior a 10 t.

O curso da câmara de freio também chamado de *stroke*, conforme Meritor, 2016, é a distância que a haste do êmbolo percorre no momento de acionamento do freio, conforme Figura 2.4, podendo variar de acordo com o modelo da câmara de freio.

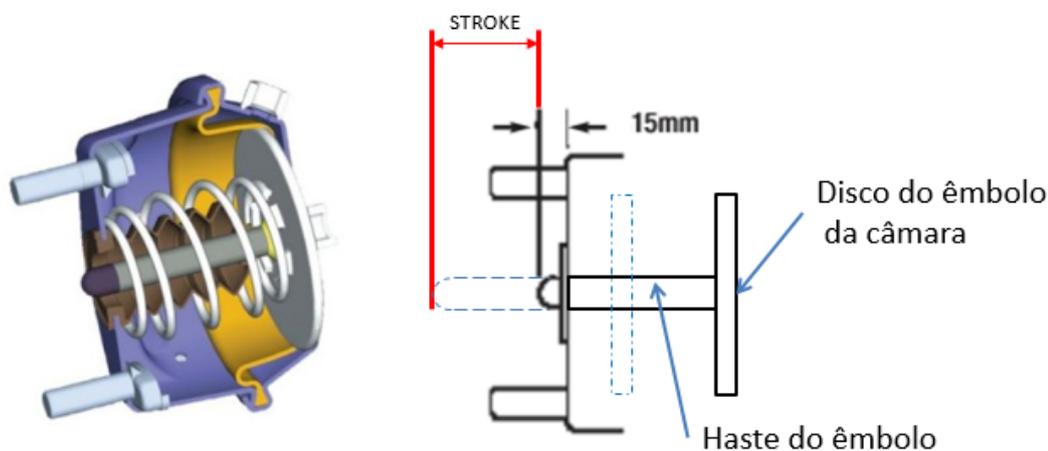


Figura 2.4 – Curso da câmara de freio (*stroke*). [Fonte: Adaptado de Meritor, 2016]

Segundo Day, 2014, o comprimento do curso da câmara de freio (ou atuador pneumático), torna-se particularmente importante em *drag tests* (que se trata de uma frenagem contínua, mantendo a velocidade constante, em uma simulação de declive) ou testes de *fade*, onde o curso do atuador disponível é um elemento essencial para atender aos requisitos prescritos pelas normas especialmente para consumo de ar. A força para superar todas perdas mecânicas e o sistema começar a gerar a força necessária para iniciar a frenagem é chamada de *Threshold Force*. Apesar de variar para cada tipo de câmara de freio, a *Threshold Force* pode variar tipicamente de 200 a 400 N.

Conforme Micke, 1990, sob condições extremas de temperaturas elevadas, o disco e a pastilha são sujeitos à elevada expansão térmica, resultando em um menor curso das câmaras de ar. Quando os freios retornam a temperaturas ambientes, uma folga maior do que a normal

é gerada devido à contração das pastilhas e disco. Isso pode levar à exigência de câmaras de ar de curso mais longo para evitar perda de desempenho devido ao efeito conhecido por *overstroking* (necessidade de cursos elevados e acima do curso da câmara).

A folga normal entre pastilha e disco, ou curso livre (*free stroke*), consiste do curso percorrido pela haste do êmbolo para que as folgas entre pastilha e discos sejam consumidas. O consumo dessa folga é feito pelo deslocamento do pistão (Item 6 da Figura 2.3), e a relação entre curso da haste do êmbolo da câmara (*stroke*) e o deslocamento do pistão é diretamente proporcional ao fator de alavancagem (A_1), ou seja, o *ratio* de cada modelo de ADB. Na Figura 2.5 é mostrado o exemplo da curva de força de acionamento pelo *stroke* em um freio a disco. Nesse exemplo o *free stroke* é de 1,25” (31,75 mm), ou seja, somente a partir desse *stroke* que a câmara inicia o fornecimento de força de acionamento para o sistema.

De fato, ao se aproximar dos cursos mais altos, a câmara de freio tende a reduzir a força, e por consequência, o valor de torque de frenagem é afetado para uma dada pressão no pedal de freios. Tais efeitos são comumente observados em ensaios severos em bancadas de testes em dinamômetro. Tipicamente, os modelos de câmaras de freios utilizados em freios a disco são do tipo “*standard*”, ou seja, com o curso padrão de *stroke* máximo de 2,5”. Aplicações mais severas, podem exigir um curso maior da câmara, e por essa razão, em alguns casos, sugere-se utilização de câmaras do tipo *long stroke* com curso de 3”. Na Figura 2.5 são apresentadas duas curvas de força (libras) x *stroke* (polegadas) de câmaras de freio quando em um acionamento a 6,89 bar, uma do tipo *standard* e outra do tipo *long stroke*. Essas curvas são obtidas com a câmara de freio desmontada do freio e em um equipamento de ensaios de tração. Além disso, é apresentado um exemplo de curva de força (libras) x *stroke* (polegadas) em um determinado freio a disco, também a 6,89 bar. O cruzamento entre as curvas representa o real valor da força de acionamento da câmara de freio (F_1), mostrada na equação 2.1, ponderada pelo *stroke* a qual ela se encontra naquele momento. Fica evidente que a força da câmara *long stroke* garante níveis maiores de força para *strokes* mais elevados. Para esse trabalho em questão, câmaras do tipo *standard* serão utilizadas.

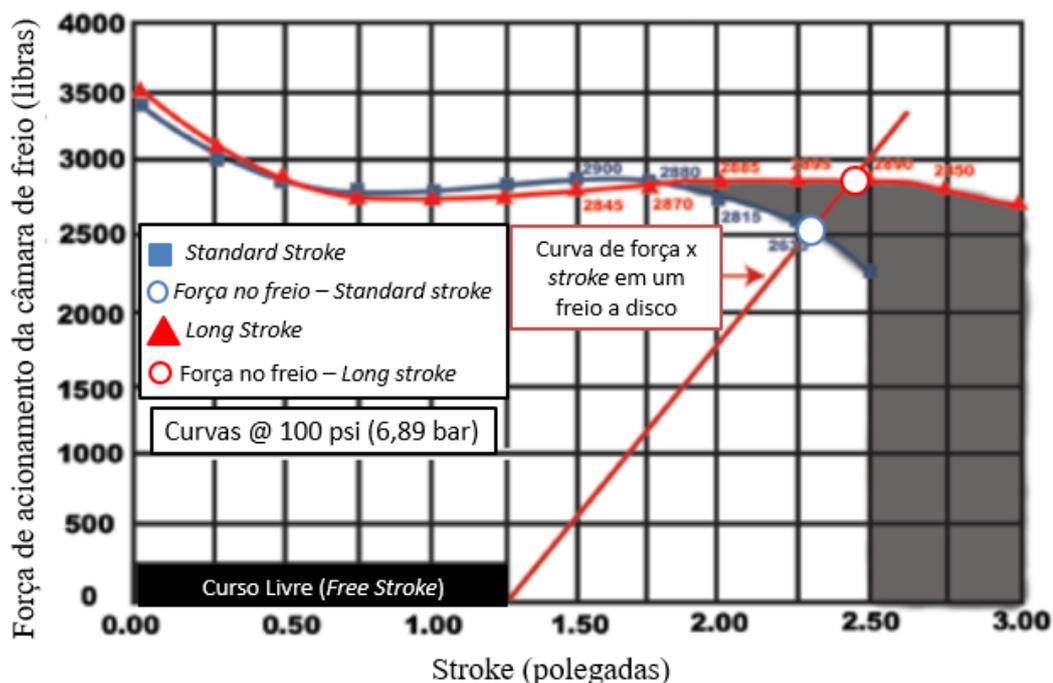


Figura 2.5 – Curvas de força de acionamento da câmara de freio pelo deslocamento da haste da câmara (*stroke*) para câmara do tipo *standard* e *long stroke* [Fonte: Adaptado de MGM Brakes, 2018]

2.1.1 Mecanismo de ajuste do ADB

Segundo Knorr-Bremse - Service Manual, 2019, a folga entre a pastilha e disco, é chamada de “*running clearance*”. O *running clearance* (folga entre disco e pastilha) é uma relação com o *free stroke* (curso da câmara para consumir todo o *running clearance*), dependente do fator de alavancagem (A_1), ou seja, o *ratio*, de cada modelo de ADB disponível no mercado. A medição do *running clearance* é realizada manualmente usando calibres de folga posicionados entre o pistão e a plaqueta da pastilha interna. Já a medição do *stroke* é feita através de um dispositivo que é acoplado ao freio, permitindo automatização. Esse dispositivo, o qual será apresentado no item 3.1 deste trabalho, conta com uma haste que acompanha o movimento do êmbolo da câmara. Valores de *running clearance* entre 0,8 e 1,2 mm são tipicamente encontrados entre pastilhas e discos, correspondendo a valores de 13 a 21 mm de *free stroke*. Para conseguir medir o *free stroke* deve-se fazer o acionamento do freio com baixa pressão na câmara, em torno de 0,6 bar. Devido ao *threshold force*, a força útil gerada sobre as pastilhas é menor do que 125 N, e isso é suficiente apenas para deslocar os

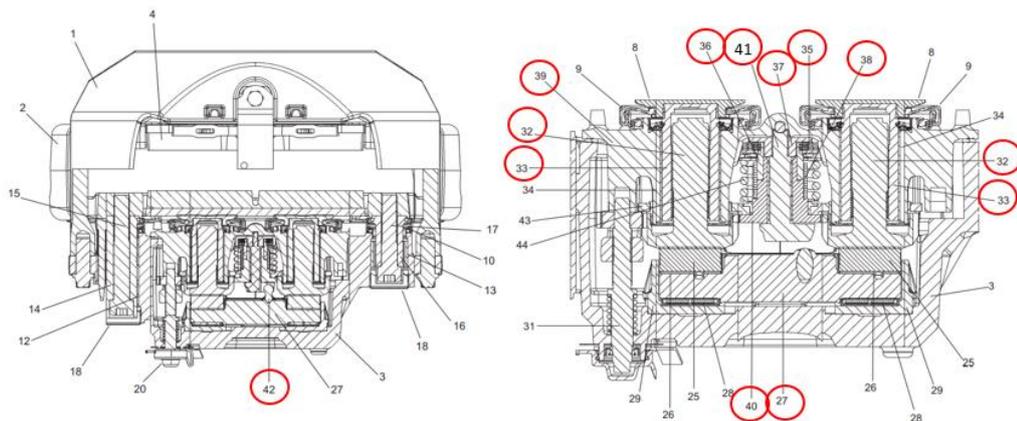
pistões do cáliper, consumir o *running clearance* e tocar levemente a pastilha. Dessa forma, pode-se desprezar a influência da deformação elástica do material de atrito a 0,6 bar.

O *running clearance* é a distância necessária para que ocorra o giro livre do disco (“*free running*”), portanto, sem restrição de frenagem ou torque residual quando o freio está no estado de repouso (sem a aplicação do freio). Também, uma grande distância entre pastilha e disco (grande “*running clearance*”) pode levar a grandes distâncias de parada do veículo para uma mesma pressão sob o pedal de freio comparado a um freio com pequena distância entre a pastilha e disco. Por projeto, a folga (*running clearance*) é definida para que seja capaz de compensar mudanças típicas da aplicação, tais como: expansão de partes devido a elevadas temperaturas, efeitos viscoelásticos das pastilhas, tolerâncias de fabricação, batimento lateral do disco (*runout*) e formação de lábios (“*lips*”). Para garantir a correta e constante folga entre pastilhas e discos, o freio é equipado com um mecanismo de ajuste, que fica localizado dentro do *housing* (Item 5 da Figura 2.2), capaz de realizar a regulação do ADB de forma automática a medida que ocorre o aumento do *running clearance* em função do desgaste da pastilha e disco de freio.

Conforme comentado no item 2.1.3, existem basicamente 2 modelos de ADB no mercado nacional. Os mecanismos de ajuste de ambos modelos possuem o mesmo princípio de funcionamento, porém, cada um deles com seu devido projeto de mecanismo de ajuste, devidamente patenteado.

O modelo desenvolvido pela Meritor será o ADB utilizado neste trabalho, desta forma, apenas esse modelo terá o mecanismo de ajuste explorado e detalhado. Para compensar o desgaste da pastilha, cada vez que o freio é aplicado, o sistema detecta se o ajuste é necessário ou se a folga de funcionamento das pastilhas de freio (*running clearance*) para o rotor do freio ainda está dentro da tolerância e avalia se precisa ou não precisa ser ajustada.

Baseado nos componentes contidos dentro do *housing* do ADB, mostrado na Figura 2.6, pode-se dividir a operação de acionamento do freio antes da ocorrência do ajuste do freio (no momento em que o mecanismo entende que o freio não precisa ser ajustado) e operação de acionamento do freio com ocorrência de ajuste (no momento em que o mecanismo entende que o freio precisa ser ajustado). A descrição de cada uma dessas operações será dada a seguir.



Conjunto do mecanismo de ajuste



Figura 2.6 – Mecanismo de ajuste de freios Meritor – ELSA 225 [Fonte: o autor, adaptado de MERITOR, 2016.]

a) Operação antes da ocorrência do ajuste do freio:

A partir da posição de repouso, a haste do cilindro pneumático avança, girando o eixo de operação (27). Assim que os pistões (33) se movem para frente consumindo todo o *running clearance*, o pino de acionamento com extremidade esférica (42) começa a entrar em contato com o lado de acionamento do garfo na extremidade do eixo ajustador (41). Nesse momento não existe mais folga entre pastilha e disco (*running clearance* = 0 mm). O movimento adicional da haste da câmara de freio (normalmente pressões acima de 0,6 bar) gira o eixo de operação (27 – que é o conjunto da alavanca do freio), fazendo com que o eixo do ajustador (41) gire. A luva de acionamento externa (37) é fixada ao eixo ajustador (41) e gira a luva de acionamento interna (36) através do pacote de embreagem (35). A luva de acionamento interna (36) está ligada à engrenagem intermediária (40) por uma mola de atrito unidirecional (38) e esta tenta girar os tuchos (32). No entanto, o atrito nas roscas dos tuchos (32) e pistões (33) começa a aumentar devido à força de acionamento entre pastilha e disco e isso impede que os pistões e tuchos girem um em relação ao outro. Os pistões não podem girar na carcaça

(39) e devido ao alto torque para girar os tuchos (32) o conjunto de embreagem (35) “desliza”, impedindo o ajuste do mecanismo abaixo da folga (*running clearance*) correta de funcionamento.

b) Operação com a ocorrência do ajuste:

Conforme ocorre o desgaste da pastilha e disco, o *running clearance* se torna maior e o ajuste do freio se torna necessário. A partir da posição de repouso, a haste do êmbolo da câmara de freio avança. Ocorre o consumo girando o eixo de operação (27) causando a rotação do eixo do ajustador (41) através do pino de acionamento com extremidade esférica (42). Assim que os pistões (33) se moveram para frente consumindo parte do *running clearance*, o pino de acionamento com extremidade esférica (42) começa a entrar em contato com o lado de acionamento do garfo na extremidade do eixo ajustador (41). O movimento adicional do eixo de operação causa agora a rotação do eixo de ajuste (41) através do pino de acionamento com extremidade esférica (42). Passando pelos discos da embreagem (35) e pela mola de fricção unidirecional (38), a engrenagem intermediária (40) gira. Nesse momento o *running clearance* apresenta uma folga excessiva ($running\ clearance > 0$) e os dentes da engrenagem intermediária giram os tuchos nos pistões (32).

Os pistões (33) não podem girar e são, portanto, rosqueados para fora de seu alojamento (39). Quando o *running clearance* é completamente consumido ($running\ clearance = 0$) por meio do avanço do pistão (33) e as cabeças do pistão iniciam um esforço adicional sobre as pastilhas (pressões acima de 0,6 bar), as pastilhas entram em contato com o rotor, a força de acionamento entre pastilha e disco aumenta o atrito da rosca nos tuchos (32) e pistões (33). O torque para girar os tuchos (32) então aumenta e o conjunto de embreagem (35) que aciona a engrenagem intermediária (40) começa a escorregar, impedindo novos ajustes. O ajuste não ocorre durante o retorno do mecanismo de atuação devido ao projeto de deslizamento unidirecional na mola de fricção. A conexão entre os dois pistões é realizada por meio de uma cremalheira que fica conectada diretamente com o mecanismo de ajuste.

Operação de auto-ajuste do freio: Segundo Jurid, 2022 é importante a verificação do *running clearance* regularmente, a fim de verificar e garantir que o mecanismo de ajuste está funcionando corretamente. Para isso, é realizada a operação de auto-ajuste do freio, o qual se trata de um procedimento executado com o freio instalado no veículo (ou ainda em

dinamômetro). O freio deve estar desregulado, ou seja, com uma folga entre disco e pastilhas acima de 1,5 mm (normalmente após instalação ou manutenção das pastilhas de freio), onde realizam-se 50 aplicações do freio em baixas pressões (em torno de 2 bar). Quando o procedimento é feito em veículo, é executado pelo motorista através da aplicação direta do pedal de freio, e em dinamômetro através de um procedimento específico, executado sem o giro do disco através do acionamento da câmara de freio. Ao final, normalmente verifica-se o valor de *running clearance* e se o mesmo encontra-se dentro da faixa típica para cada modelo de freio. Valores de *running clearance* muito elevados representam baixa performance e aumento da distância de parada. Já valores baixos de *running clearance* dificultam o resfriamento do freio, ocorrência de torque residual devido ao atrito entre pastilha e disco, superaquecimento dos freios, redução na performance, vibração, ruído e ainda danos ao disco e pastilhas.

2.1.2 Tempo para acionamento e consumo do *running clearance* ou *free stroke*

Na Figura 2.7, tem-se em Figura 2.7 (a) o gráfico típico de um acionamento de freio em dinamômetro simulando uma frenagem a 60 km/h @ 100°C no disco de freio. Nessa figura estão sendo mostradas as curvas de torque de frenagem (Nm), pressão de acionamento (bar), *stroke* (mm) e velocidade (km/h) contra o tempo (s). Realizando a ampliação da parte inicial das curvas (Região A), tem-se na Figura 2.7 (b) o detalhamento das curvas, mostrando onde inicia-se o movimento da haste da câmara, ou seja, o início do movimento do *stroke* (ponto i) – linha rosa (mm) e, simultaneamente, em função do contato entre a pastilha e disco, tem-se também o início da curva de torque de frenagem (ponto f) – linha azul (Nm). Para uma determinada rampa de pressão de acionamento, o tempo de acionamento e consumo do *running clearance* ou *free stroke* pode variar. Em uma caso como o exemplo da Figura 2.7, onde a rampa de acionamento apresenta uma taxa de incremento de pressão de 290,11 psi / seg (20 bar / seg), a diferença de tempo entre o ponto f e o ponto i é de aproximadamente 0,04 segundos. Esse é o intervalo de tempo necessário para que todo o *running clearance* ou *free stroke* seja consumido, e ao ser totalmente consumido, o conjunto de embreagem (componente número 35 da Figura 2.6) começa a escorregar, impedindo novos ajustes.

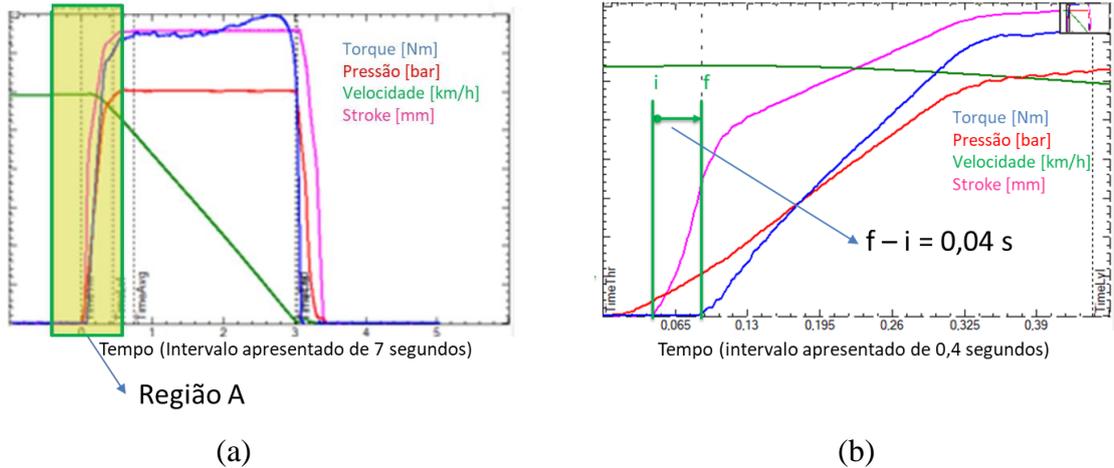


Figura 2.7 – (a) Acionamento de freio a 60km/h @ 100°C: curvas de torque de frenagem (Nm), pressão de acionamento (bar), *stroke* (mm), velocidade (km/h) contra o tempo (s) em dinamômetro; (b) ampliação na região A: análise da curva de *stroke* – linha rosa (mm) e da curva de torque de frenagem – linha azul (Nm) [Dados cedidos pela Fras-le S/A]

2.1.3 Expansão térmica dos materiais sólidos

Segundo Callister, 2010, a maior parte dos materiais sólidos se expandem quando aquecidos e contraem quando resfriados. Em uma perspectiva atômica, a expansão térmica representa o aumento da distância média dos átomos com o aumento da temperatura.

Geralmente, o comprimento total do material em uma determinada direção (L), aumenta com o crescimento da temperatura (T). Esta relação é analisada pelo coeficiente linear de expansão térmica (α), de acordo com a equação 2.4 [Shackelford, 2008].

$$\alpha = \Delta L / (L_0 \cdot \Delta T) = (L_f - L_0) / [L_0 \cdot (T_f - T_0)] \quad (2.4)$$

Temos que L_f e L_0 são respectivamente o comprimento final e inicial, em [m], para a variação de temperatura final e inicial, respectivamente representada por T_f e T_0 , em [°C]. O coeficiente linear de expansão térmica (α), representa uma propriedade do material que indica o quanto um material se expande quando aquecido, e sua unidade é o inverso da temperatura sendo dado por $[m / (m \cdot ^\circ C)]$ ou ainda segundo Callister, 2010, apenas $[^\circ C]^{-1}$. Callister, 2010, ainda comenta que quanto maior for a energia de ligação interatômica, menor o coeficiente de expansão térmica.

Como exemplo para a aplicação desta equação 2.4, pode-se citar a dilatação da espessura do disco durante o aquecimento no momento da frenagem, que de uma forma simplificada considerando um disco sólido, inicialmente em temperatura $T_0 = 25^\circ\text{C}$ e espessura na região da pista sendo $L_0 = 45\text{mm}$, ao se aquecer até a temperatura de $T_f = 400^\circ\text{C}$ e com o respectivo coeficiente linear de expansão térmica $(\alpha) = 11,8 \times 10^{-6} [^\circ\text{C}]^{-1}$ indicado por Callister, 2010, tem-se como resultado um valor de $L_f = 46,99\text{mm}$, ou seja, uma expansão térmica de $\Delta L = 1,99\text{mm}$.

2.1.4 Energia de frenagem e a temperatura das pastilhas e disco

Segundo Thuresson, 2000, a função primária dos freios automotivos é transformar energia cinética e potencial em calor na superfície de atrito do rotor e do material de fricção. Ainda, Thuresson, 2000, complementa que a geração de calor é o produto das variáveis de velocidade de deslizamento entre a pastilha e o rotor, a pressão mecânica de acionamento das pastilhas e o coeficiente de atrito do par tribológico.

Segundo Nong *et al.*, 2017, Limpert, 2011 *apud* Pavlak R. P, 2021, a energia dissipada na frenagem é resultado do somatório da energia cinética de avanço do veículo, da energia cinética dos componentes giratórios do veículo e da energia potencial (negativa em ascendente e positiva caso o veículo esteja em direção descendente), conforme apresentado na equação 2.5. Para complementar o entendimento, na Figura 2.8 é possível verificar as variáveis cinéticas e potenciais relacionadas com a energia de frenagem descrita.

$$E_f = \frac{m}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) + \frac{I}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2) \pm W \cdot h \quad (2.5)$$

Onde “ m ” é a massa do veículo, em [kg]; “ V_1 ” é a velocidade inicial, em [m/s]; “ V_2 ” é a velocidade final, em [m/s]; “ I ” é o momento de inércia dos componentes giratórios, em [kgm²]; “ w_1 ” é a velocidade angular inicial dos componentes giratórios, em [s⁻¹]; “ w_2 ” é a velocidade angular final dos componentes giratórios, em [s⁻¹]; “ W ” é o peso do veículo, em [N]; “ h ” é a variação de altura, em [m], e E_f é a energia de frenagem, [Nm].

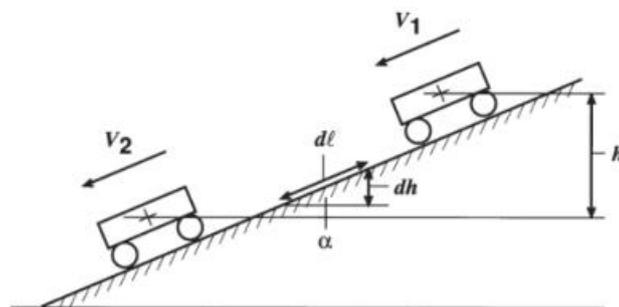


Figura 2.8 – Representação das variáveis cinéticas e potenciais em uma pista inclinada [Fonte: Limpert, 2011]

A Figura 2.9 apresenta um exemplo da distribuição de temperatura envolvida no sistema de freio após longas e repetitivas frenagens. Nessa situação, o fluxo de calor entre rotor, material de fricção e ambiente são função da troca de calor por condução, convecção e radiação combinadas. O calor é gerado por efeito Joule na interface entre disco e material de fricção e é transferido às demais regiões por condução. O disco de freio é o componente que absorve a maior quantidade de calor e precisa dissipar de forma eficiente a fim de garantir que não ocorra superaquecimento do sistema [Lee, 1999 apud Pavlak, 2021]. Limpert, 2011, afirma que para os freios funcionarem de forma correta e estável, eles precisam ser dimensionados visando um resfriamento suficiente para permitir operar em condições normais de temperatura.

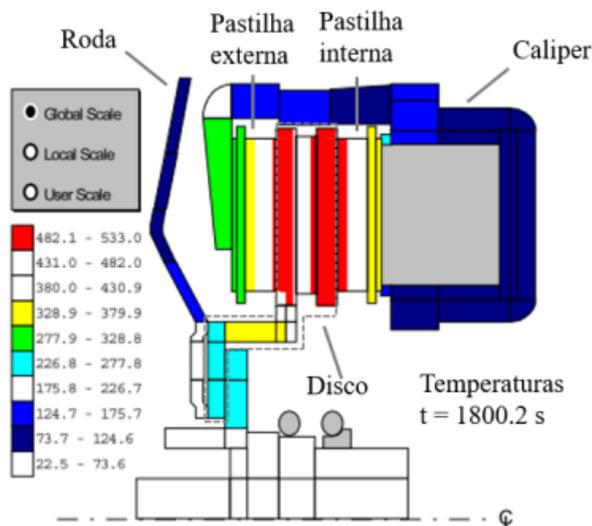


Figura 2.9 - Representação da distribuição de temperatura em um sistema de freio a disco [Fonte: Pavlak, 2021, adaptado de: Lee, 1999].

Em um estudo prévio, que não será abordado nesse trabalho, pôde-se observar forte correlação entre os dados de temperatura obtidos nas análises térmicas via análise de elementos finitos (FEA) e dados experimentais medidos com termopares e por meio de um termômetro digital infravermelho portátil. A Figura 2.10 apresenta os resultados das análises numéricas e dos valores de temperatura medidos. Fica evidente o gradiente térmico existente entre os componentes do sistema, tais como disco, pastilhas/plaqueta e cubo de roda.

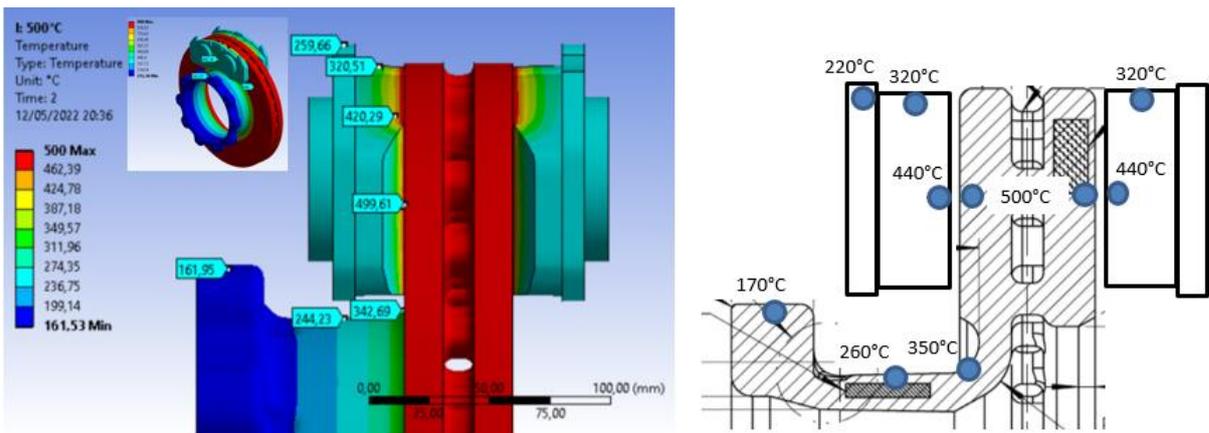


Figura 2.10 – Distribuição da temperatura em freio a disco de roda 22,5". Na esquerda dados obtidos em elementos finitos e na direita dados experimentais. [Fonte: Relatório Técnico - SIDEP 1178-21]

A distribuição de energia entre a pastilha e o disco, resultante da interação tribológica dos dois componentes, pode ser diretamente relacionada à resistência térmica de ambos [Nong *et al.*, 2017]. Silva *et al.*, 2008, por meio de um estudo experimental e numérico, calcularam a distribuição do calor gerado que fica retido entre disco, pastilha e dissipado por convecção durante uma série de frenagens. As frenagens foram realizadas em um freio de veículo leve e disco sólido, com atuação hidráulica, mantendo a pressão de atuação constante. Com os valores de temperatura registrados experimentalmente em dinamômetro, calibraram o modelo numérico. Obteve-se uma correlação de mais de 95% na temperatura final registrada entre as frenagens experimentais e simuladas numericamente. Dessa forma, concluiu-se que, durante as frenagens, mais de 92% do calor gerado durante a frenagem fica concentrado no disco, aproximadamente 5% é direcionado para as pastilhas e o restante é dissipado por convecção.

Esse efeito da temperatura afeta diretamente a compressibilidade da pastilha. A compressibilidade é descrita como sendo o deslocamento, ou redução de volume, medido no

material de atrito em condições de temperatura e pressão constantes [Brezolin, 2007]. A norma internacional ISO 6310 estabelece os critérios, equipamentos mínimos e procedimento para a medição do nível de compressibilidade de material de atrito para ADB.

Santos et al, 2021, mostram que quanto maior é a compressibilidade do material de atrito, maior será o *stroke* obtido com a câmara de freio no ADB. A temperatura é um fator determinante, e da mesma forma, quanto maior a temperatura na pastilha de freio, maior será a compressibilidade e maior será o *stroke* no ADB.

É muito importante entender que não se pode simplesmente reduzir a compressibilidade de um material de atrito, com o objetivo de reduzir o nível de *stroke*. Brezolin, 2007, afirma que o material de atrito com baixa compressibilidade (ou seja, mais rígido, ou ainda, com menor flexibilidade), apresenta uma pressão de contato não uniforme com o rotor e acaba provocando pontos quentes na superfície do disco. Ao longo das repetições das frenagens, esses mesmos pontos sofrem esforços compressivos gerando deformações plásticas, que ocasionam o aparecimento de trincas térmicas nos discos.

2.1.5 Desgaste do material de atrito e do disco

Segundo Stachowiak, 2005, os principais mecanismos de desgaste de materiais de atrito são: Adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo. A taxa de desgaste do material de atrito é influenciada diretamente pela aplicação ao qual o material é submetido. Santos, 2019, mostra que frenagens alternadas, como as normalmente encontradas em campo, geram um distúrbio na superfície, e o desgaste é mais acentuado do que em uma condição de blocos repetitivos, normalmente utilizados em procedimentos de testes em dinamômetro.

De fato, muitos (senão todos) desses mecanismos de desgaste podem ocorrer simultaneamente, e, na prática, a combinação de tais mecanismos com o desgaste e aumento de folgas dos componentes internos do sub sistema mecânico (cáliper, câmara, disco) tende a dificultar ou prejudicar o contato entre pastilha e disco.

Alguns fabricantes de freios, indicam algumas condições de desgaste que devem ser respeitadas, principalmente ao se tratar de desgastes máximos de pastilhas e discos, mas também ao se tratar de desgaste irregular das pastilhas. Alguns pontos merecem ser destacados, conforme descrito pela Knorr-Bremse em seu manual de serviço [Knorr-Bremse - Service Manual, 2019]:

- Desgaste máximo da pastilha: As pastilhas novas possuem $C = 21$ mm, aproximadamente, sendo C a espessura total de material de atrito na pastilha. Deve-se substituir o jogo de pastilhas (de todo eixo) em caso de a dimensão do material de atrito atingir $C = 2$ mm de espessura. Conforme a Figura 2.11, essa condição caracteriza o fim de vida;

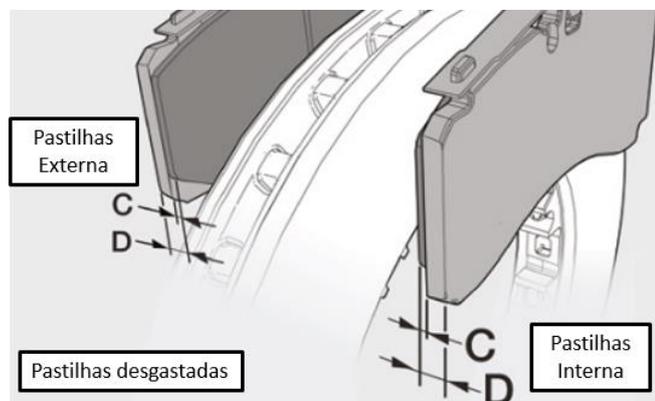


Figura 2.11 – Desgaste máximo das pastilhas de freio [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019]

- Desgaste irregular tangencial: Conforme mostrado na Figura 2.12, não é recomendado que o desgaste oblíquo no sentido tangencial supere 2 mm de diferença. Deve-se realizar a inspeção de folgas nos guias do calíper e garantir movimento livre das pastilhas.

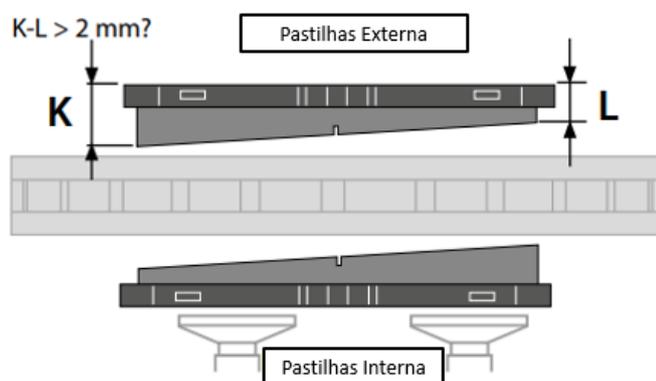


Figura 2.12 – Desgaste oblíquo no sentido tangencial [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019]

- Desgaste irregular radial: Conforme mostrado na Figura 2.13, não é recomendado que o desgaste irregular no sentido radial supere 1 mm de diferença. Deve-se realizar a inspeção de folgas nos guias do calíper, garantir movimento livre das pastilhas, avaliar contato com outras partes do eixo ou veículo e até mesmo sujeira excessiva.

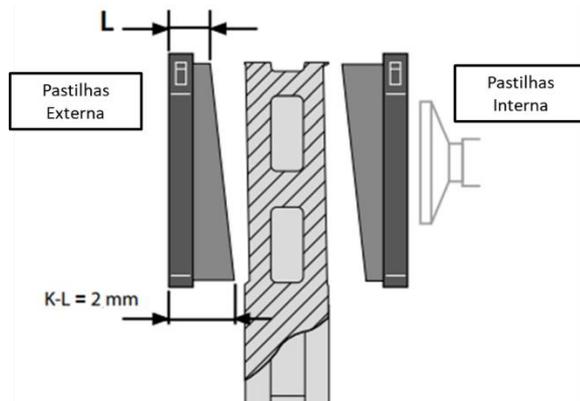


Figura 2.13 – Desgaste irregular no sentido radial [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019]

- Desgaste máximo do disco: A condição de disco novo apresenta valor de $M=45\text{mm}$, porém o fim de vida do disco é identificado por $M=37\text{ mm}$. Se $M \leq 39\text{ mm}$ ou $N \leq 1\text{ mm}$, recomenda-se a substituição dos discos tão logo quanto possível ou na próxima troca de pastilhas, conforme indicado na Figura 2.14:

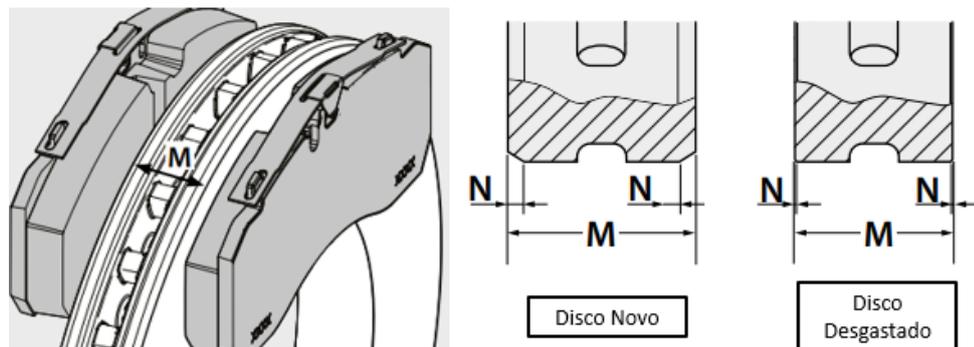


Figura 2.14 – Desgaste máximo do disco [Fonte: adaptado de Knorr Bremse - Service Manual, 2019]

Algumas pequenas variações com relação ao sistema fornecido pela Meritor podem ser identificadas, conforme Meritor, 2016, tais como a identificação do final de vida das pastilhas, que é indicado por $C = 3\text{ mm}$ (ao invés de $C = 2\text{ mm}$), final da vida do disco, que é indicado por $M \leq 39\text{ mm}$. Pouco é explorado com relação ao desgaste irregular em seus manuais. Segundo um Treinamento técnico Meritor, 2022, é possível verificar a indicação de dimensões de desgaste irregular radial máximo de 2 mm e tangencial de 3 mm , o que

contrapõe os dados fornecidos por Knorr Bremse, que são de 2 e 1 mm para o desgaste tangencial e radial, respectivamente.

2.2 Pastilha de freio e o material de atrito

2.2.1 Atrito

Segundo Rabinowicz, 1965 apud Neis, 2012, o atrito é definido como a resistência ao movimento que existe quando um objeto sólido é movido, ou quando há a tentativa de produzir tal movimento, tangencialmente com relação a uma superfícies em contato.

Conforme Halliday et al., 1996, a relação entre a força de atrito e a força normal da origem a uma grandeza adimensional conhecida por coeficiente de atrito, conforme pode-se ver na equação 2.6 :

$$F_a = \mu \cdot F_N \quad (2.6)$$

Onde, F_a é a força de atrito entre as superfícies, em [N], μ é o coeficiente de atrito [-], parâmetro adimensional, e F_N é a força normal aplicada para manter as superfícies em contato, em [N].

Segundo Al-Bender e Swevers, 2008 apud Neis, 2012, os mecanismos físicos que explicam a força de fricção quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra com o movimento relativo são:

- a) Adesão: refere-se a força tangencial ou força de cisalhamento que surge quando as superfícies estão relativamente próximas.
- b) Deformação: essas forças são decorrentes das deformações geométricas que ocorrem entre as asperezas das superfícies quando as mesmas passam umas sobre as outras.

A interação dinâmica entre esses mecanismos são extremamente complexos, assim como o entendimento do comportamento do atrito. No campo da robótica, uma informação não acurada sobre o comportamento do atrito pode arruinar o desempenho de um sistema [Al-Bender e Swevers, 2008 apud Neis, 2012], Corroborando com o comentário dos autores, em sistemas de freios, uma interpretação incorreta do comportamento do atrito, pode interferir na parametrização e configuração de sistemas eletrônicos, tais como ABS e EBS, essenciais para a segurança veicular.

2.2.2 Material de Atrito

É notório que ano após ano as montadoras buscam aumentar a capacidade de carga de seus produtos a fim de otimizar cada vez mais o transporte de carga terrestre. Segundo Nicholson, 1995, novas gerações de materiais de fricção têm buscado um material orgânico que não se desintegre nas temperaturas de trabalho e que ao mesmo tempo proporcione uma boa estabilidade do nível de atrito, com baixo desgaste e baixa agressão ao disco. Matozo, 2006 ainda complementa que as condições operacionais aos quais o sistema de freio é submetido são bastante variadas, fazendo com que os materiais de fricção necessitem atender a uma ampla gama de requisitos.

Segundo Brezolin, 2007, as características mais importantes para um material de atrito podem estar classificadas em quatro grupos:

- Mecânicas: dureza, resistência à compressão e resistência ao cisalhamento;
- Segurança: nível de coeficiente de atrito, transmissão térmica, sensibilidade à pressão, sensibilidade à temperatura, sensibilidade à água e sensibilidade à velocidade;
- Conforto: estabilidade do coeficiente de atrito, adesão ao disco de freio e geração de ruídos e vibrações;
- Custo: custos de produção, corrosão e desgaste do disco e pastilha

Conforme Lamb, 2008, os materiais de fricção para freio são normalmente compósitos de matriz polimérica constituída pela compactação a quente de diferentes pós, sendo esses de distintos componentes, tipicamente, variando entre 10 e 20 tipos. Além disso, Brezolin, 2007, comenta que as pastilhas de freio têm composições de diferentes tipos de materiais e são tratadas com sigilo industrial.

Segundo Lamb, 2008 e Nicholson, 1995, os materiais de atrito com a fração de matérias-primas metálicas ferrosas, podem ser classificados por:

- Não metálica (low-met): menos de 10 % de metal;
- Intermetálica (Semi-met): entre 10 e 40 % de metal;
- Metálica (Met): acima de 40 % de metal;

Casari, 2009, reporta que as diferentes matérias-primas usadas possuem diferentes funcionalidades no projeto do compósito, e ele, assim como outros autores, tais como Nicholson, 1995, Limpert, 1999, Matozo, 2006, Matozo 2012, Severo, 2016, agrupa-os em

cinco grupos distintos, ainda que algumas vezes algumas matérias primas assumam características condizentes com mais de um grupo.

1. Ligantes ou aglomerantes: têm a função de matriz no material de fricção, ou seja, manter todos componentes do material unidos e agregados. Exemplo disso são as resinas fenólicas, largamente empregadas em materiais de fricção por conta de suas propriedades térmicas e mecânicas.
2. Atritantes ou abrasivos (modificadores de atrito com elevada dureza): responsáveis pelo aumento do coeficiente de atrito. Essas matérias primas devem ser utilizadas em pequenas quantidades na formulação, pois podem agredir o rotor e afetar a durabilidade do material de fricção. Exemplos: Óxidos de alumínio, silicato de zirconita e óxido de cromo.
3. Lubrificantes (modificadores de atrito de baixa dureza): responsáveis pela estabilidade do atrito e favorecer os mecanismos tribológico que diminuem o desgaste do material de atrito. São exemplos: grafites, coques, talcos e sulfetos metálicos.
4. Cargas: Tem a função de preenchimento, usados em grandes volumes dentro da composição. Devem possuir boa estabilidade térmica, mecânica, dureza intermediária. Não devem influenciar significativamente nas propriedades de atrito e lubrificação. Exemplos de materiais: sulfato de bário, carbonato de cálcio e caulim.
Dentro das cargas também são empregados os elastômeros (Viscoelásticos) que são os componentes que alteram a rigidez do compósito, sendo representados pelas borrachas. O controle da flexibilidade do material de atrito impacta na manutenção da pressão de contato entre o rotor e o estator.
5. Fibras (Reforços): atuam na resistência mecânica e na condutividade térmica do material de atrito. O comprimento, alinhamento ou desalinhamento, forma da fibra e tamanho influenciam no módulo de elasticidade do material de atrito, ou seja, na rigidez. Exemplos: fibra de vidro, aramida, metálicas

Para atender aos requisitos de diferentes mercados, é necessário um ótimo balanço do tipo e quantidade de cada matéria prima. Os materiais da família dos semi-metálicos, por exemplo,

são empregados em condições severas de frenagem, com grandes desacelerações e atingindo altas temperaturas. Esses materiais utilizam maiores quantidades de componentes metálicos, como por exemplo, fibras de aço [Matozo, 2006, Severo, 2016].

2.2.3 Processo de manufatura das pastilhas de freio

A Figura 2.15 demonstra uma pastilha de freio que é produzida pela junção de duas partes, sendo o material de atrito e uma plaqueta metálica, que tem como função servir de apoio e fixação do material de atrito no sistema de freio [Menetrier, 2006].

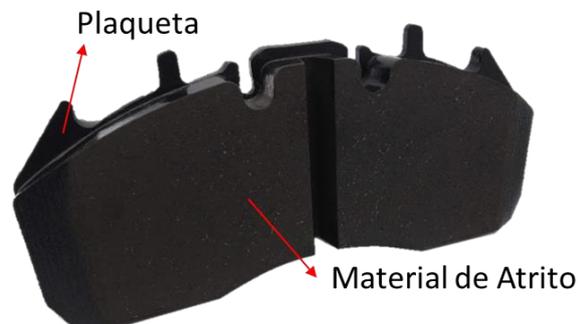


Figura 2.15 – Exemplo de um modelo de pastilha de freios usadas em ADB [Fonte: O autor].

O fluxograma da Figura 2.16 apresenta o processo de produção típico de pastilhas usadas em ADB. Segundo Menetrier, 2006, as principais etapas consistem em estampagem da plaqueta metálica e posterior preparação com adição de camada de adesivo, mistura do material de atrito, compactação a frio da mistura com a plaqueta (chamada de pré-forma), prensagem a quente (conformação a quente), tratamento térmico (cura) da pastilha e, por fim, beneficiamento e embalagem.

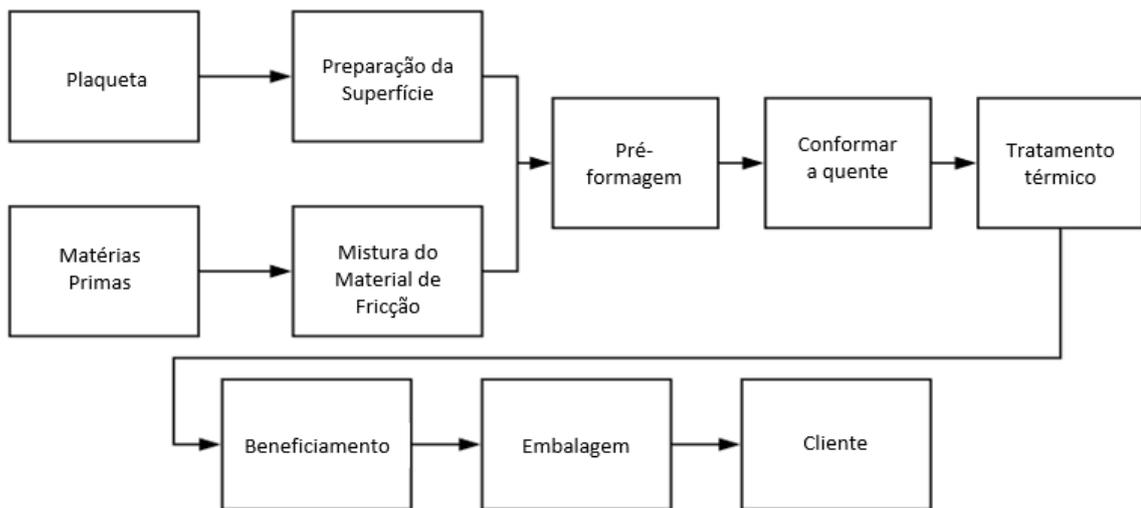


Figura 2.16 – Fluxograma do processo de fabricação de pastilhas de freio usadas em ADB
[Fonte: O autor].

2.3 Dinamômetro Inercial

Conforme a NBR 10753, a bancada de ensaio de freio do tipo inercial (dinamômetro inercial), é um equipamento que permite simular condições de frenagens com paradas reduzidas ou contínuas, em condições variadas de velocidade. Os principais ensaios realizados em dinamômetro são: *performance* (atrimento), desgaste, trincas, ruído e testes estáticos [Brezolin, 2007]. Pode-se compilar e relacionar dados de temperatura em disco e pastilha, distância de parada, desaceleração, velocidade, pressão de atuação, curso da câmara de freio (*stroke*), desgaste de material de atrito e disco [Iombriler, 2002].

Este equipamento armazena energia cinética proveniente da energia dos discos inerciais conectados a um eixo girante, o qual conecta em uma das extremidades o motor elétrico e na outra extremidade o disco de freio [Neis, 2012]. Um tacômetro faz a leitura do número de rotações por minuto do motor. Do outro lado do dinamômetro, o cáliper fica preso ao *hardware* (parte do eixo do veículo) e uma célula de carga (torquímetro) faz a leitura do torque gerado pelo freio, conforme pode-se ver na Figura 2.17.

Segundo Sanders et al., 2001 apud Neis, 2012, os efeitos como a deflexão do cáliper e de elementos de fixação do freio exercem influência significativa sobre os resultados do ensaio. Por essa razão, os testes são realizados com o próprio sistema de freio (disco e cáliper) original do veículo montados sobre o equipamento [Neis, 2012].

No caso deste trabalho, testes estáticos (sem o giro das massas inerciais) e dinâmicos foram realizados. O *software* utilizado para o controle, monitoramento e pós-processamento utilizado no trabalho é o *RevData Plus* da empresa *Link*.

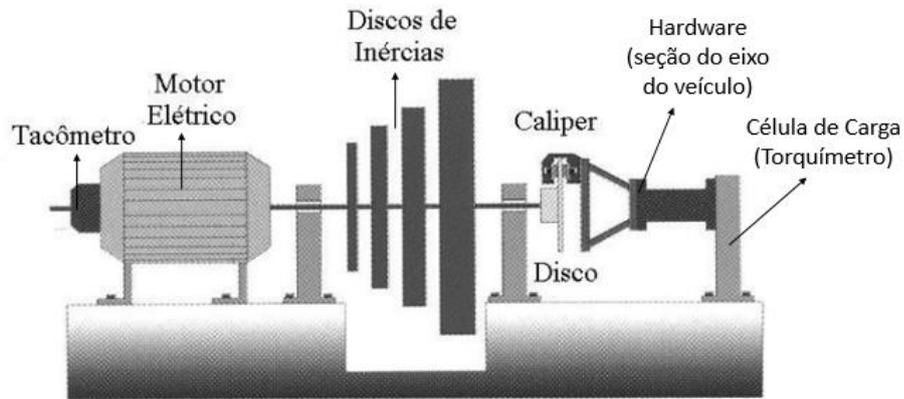


Figura 2.17 – Esquema de dinamômetro inercial [Fonte: adaptado de Haynes, 1999 apud Neis, 2012].

2.4 Influência da deformação da pastilha e sistema sobre o *stroke* (Análises Estáticas)

Em um estudo prévio do autor da presente dissertação [Santos et al, 2021], foi realizado um trabalho a fim de avaliar a influência da deformação do material de atrito e do sistema de freio no curso total da câmara de freio (*stroke*). Foram definidos 05 influenciadores (formulações, compressibilidades, espessuras de material de atrito, a temperatura e a utilização de chanfros no material de atrito das pastilhas) e avaliou-se os efeitos de tais influenciadores sobre o *stroke*. Os ensaios seguiram a utilização de 2 métodos de análise, sendo o Método 1 (M1) e Método (M2), conforme pode-se verificar detalhadamente no APÊNDICE B.

De forma resumida, os 05 influenciadores (formulações, compressibilidades, espessuras de material de atrito, a temperatura e a utilização de chanfros no material de atrito das pastilhas) influenciam no comportamento e no valor máximo de pico nas curvas de deflexão da pastilha x pressão (medidos através do 1º ciclo de compressibilidade a frio da pastilha - M1), e de forma similar, porém nem sempre com a mesma intensidade, no valor de pico de *stroke* no ADB (M2). Abaixo seguem alguns comentários sobre os efeitos:

- Efeito da Formulação: o efeito da diferença da compressibilidade a frio das formulações prevalece ao efeito do uso de diferentes formulações. Assim, o efeito da formulação fica restrito a uma sutil variação no comportamento do perfil da curva de deflexão (M1) e ou *stroke* (M2), durante o carregamento e/ou alívio da carga.
- Efeito da compressibilidade da pastilha: para mesmas formulações, as que apresentam menores compressibilidades a frio, tenderam a apresentar menores picos de deflexões (M1) e menores *stroke* (M2).
- Efeito da espessura da pastilha e rigidez do sistema: conforme o material de atrito se aproxima do final de vida, as deformações do sistema de freio aumentam, independentemente da compressibilidade do material empregado. Isolando o efeito do material de atrito, por meio da utilização dos blocos de aço simulando início e fim de vida, verificou-se que o *stroke* (M2) é maior quando o cáliper está deslocado para compensar o fim de vida. Já, com o uso de pastilhas em fim de vida, verifica-se que elas tendem a ficar mais rígidas, apresentando menores picos de deflexão da pastilha (M1) e, consecutivamente, menores *strokes* (M2).
- Efeito da temperatura: a temperatura representa uma importante contribuição para o aumento do *stroke* (M2). Essa contribuição se deve ao aumento do pico de deflexão (M1) das pastilhas conforme o aumento da temperatura.
- Efeito da utilização de chanfros: ao utilizar chanfros, mesmo com pastilhas de mesmos valores de compressibilidade a frio, ocorre o aumento da pressão específica de contato devido à redução da área de contato da pastilha com o disco. Isso pode implicar no aumento do pico da deflexão (M1) e, conseqüentemente, o aumento de *stroke* (M2).

Além disso, Santos et al, 2021, complementam explicando que a maior contribuição do *stroke* é proveniente das deformações do sistema de freio (cáliper e seus componentes internos), independentemente do material de atrito aplicado, sendo que na condição a frio e em início de vida tem-se a relação de contribuição (RC) igual a $RC = 58/42$ (58 % no sistema e 42 % no material de atrito), na condição a frio e em fim de vida tem-se $RC = 63/37$ (63 % no sistema e 37 % no material de atrito) e já em inicio de vida e na condição a quente, tem-se $RC = 70/30$ (70 % no sistema e 30 % no material de atrito).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo, é apresentada a metodologia, materiais e métodos utilizados para a avaliação do comportamento do curso da haste da câmara de freio (*stroke*) de um modelo de ADB da linha pesada em relação aos diversos efeitos que recaem sobre o material de atrito quando submetido à condição de operação dinâmica do freio, ou seja, com o giro do disco de freio.

3.1 Medição do curso da câmara de freio (*stroke*) e instalação do ADB

Os ensaios realizados neste trabalho utilizaram um sistema de medição do *stroke* através de um dispositivo especificamente desenvolvido e acoplado ao sistema de freio. Esse dispositivo conta com uma haste que acompanha o movimento do êmbolo da câmara, tendo seu retorno realizado por molas, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

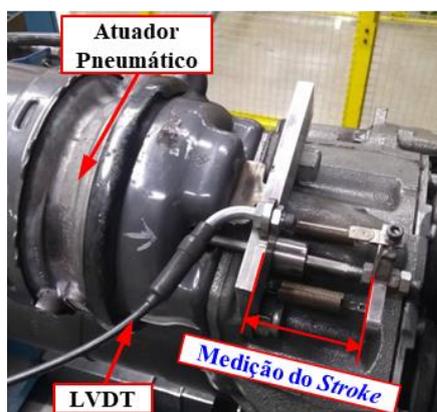


Figura 3.1 – Dispositivo de medição do curso da câmara de Freio [Fonte: o autor].

Além disso, na Figura 3.2, pode-se verificar a instalação do sistema de freio no dinamômetro, bem como a disposição dos aparatos de medição de *stroke*. Um transdutor para medição de deslocamento linear (LVDT - *linear variable differential transformer*), que fica conectado a haste através de um cabo de aço, realiza a leitura do valor de *stroke* e seu valor é registrado através do próprio equipamento de aquisição de dados do dinamômetro inercial, denominado de *RevData Plus* da empresa *Link*, desde a condição de freio em repouso até a condição de freio acionado. A taxa de aquisição foi configurada para 250 Hz, garantindo assim uma resolução adequada para os dados coletados e uma incerteza de medição de ± 1 mm.

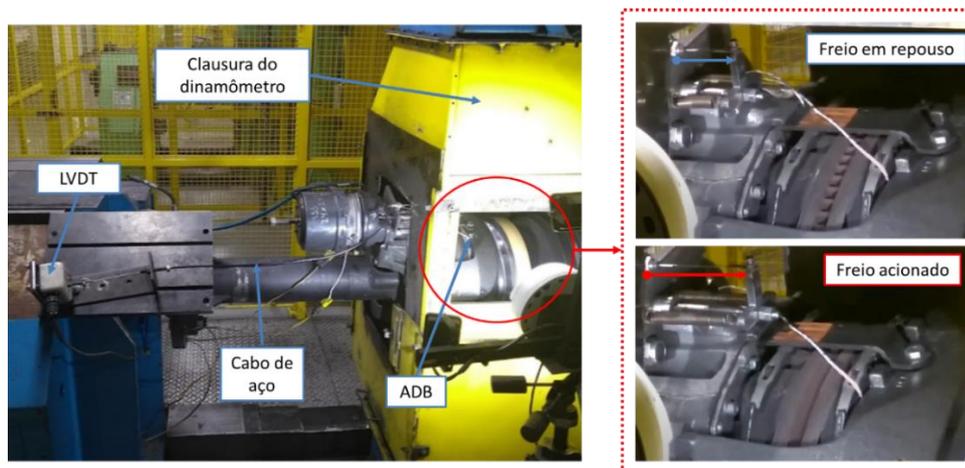


Figura 3.2 – Disposição dos aparatos de medição e instalação do freio no dinamômetro [Fonte: o autor].

3.2 Modelo de freio a disco utilizado

Os dados do freio e seus componentes utilizados no teste podem ser encontrados na Tabela 3.1 abaixo. Nesta mesma tabela também é detalhada a geometria da pastilha de freio:

Tabela 3.1 – Descrição do freio e geometria de pastilha avaliada

	Item	Descrição
Informações do Freio	Tipo de Freio	ADB Comercial – Roda de 22,5”
	Alavancagem (A_l)	17 (a 45 mm de stroke)*
	Tipo de Câmara de Freio	24
	Máxima Força da Câmara @ 10 bar	13 kN
	Força mínima para superar as resistências - <i>Threshold Force</i> (Th)	100 N
	Máxima Força nos Pistões @ 10 bar	206 kN
	Raio Efetivo	171 mm
Informações das Pastilhas de Freio	Tipo de Pastilha de Freio (geometria)	PD/196
	Dimensões da Pastilha de Freio	249.8 mm x 109.5 mm x 30 mm
	Área de Contato das Pastilhas (Sem Chanfros)	91,8 cm ² x 2 = 183,6 cm ²
Informações do Disco Ventilado	Espessura do Disco / Diâmetro Externo	45 mm / 434 mm
	Material	Ferro Fundido cinzento

*Em aproximadamente 45mm de curso, a relação de alavancagem é de 17:1, mas a proporção é menor em *strokes* baixos e maior em *strokes* altos. Esta estratégia conserva o consumo do curso disponível da câmara (que neste caso é de 65 mm), ao mesmo tempo em que permite uma maior alavancagem conforme a câmara atinge o final de seu curso,

compensando a perda de força de saída. Em geral, os freios da Meritor trabalham com a estratégia de relação variável.

3.3 Amostras utilizados nas análises

Duas formulações foram utilizadas neste trabalho, formulações A e C. Para cada ensaio é necessário 1 par de pastilhas. Da formulação A selecionou-se 2 pares da A (A1 e A2) e da formulação C selecionou-se 5 pares (C3, C7, C8, C9, C10 e C11). A fim de identificar as amostras, números após a letra foram usados. Em função deste trabalho ser uma continuação de um artigo anterior do autor da presente dissertação [Santos et al, 2021], a formulação C não segue uma sequência contínua de números.

Na Tabela 3.2 pode-se verificar os percentuais de matérias-primas de cada um dos dois tipos de compósitos de matriz polimérica das respectivas de pastilhas de freio chamadas nesse trabalho de Material A e C. Classificou-se o tipo de material em metálico e intermetálico, de acordo com quantidade de materiais metálicos ferrosos contida na composição.

Tabela 3.2 – Composição do Material A e C

Matérias- primas	% Volume	
	Material A	Material C
Classificação pelo % metal	Metálica	Intermetálica
Aglomerantes	17,0	19,5
Fibras metálicas + Fibras orgânicas	28,0	17,0
Abrasivos	2,0	16,5
Lubrificantes	46,0	34,0
Cargas	7,0	13,0

Os principais fatores que determinam as características do processo de fabricação das pastilhas de freio são: temperatura de prensagem, pressão de prensagem, tempo de ciclo, temperatura de cozimento. As amostras foram processadas através de um processo de cura quente com diferentes temperaturas para cada formulação A e C. Por consequência, valores bem distintos de compressibilidades a frio a 5 MPa foram obtidos entre o material A e C, sendo em geral mais elevada no material C.

A seleção das amostras foi realizada da forma descrita por Santos et al, 2021, por meio do procedimento de testes padrão ISO 6310:2009 método B, conforme descrito no APÊNDICE B, onde agrupou-se amostras com valores similares de característica de compressibilidade a frio a 5 MPa (μm) para cada formulação. O equipamento utilizado para os ensaios de compressibilidade foi o equipamento da Link, modelo 1620. O ensaio é não destrutivo e as amostras podem ser utilizadas posteriormente para outros ensaios. Os resultados de compressibilidade a frio (μm), assim como o detalhamento do grupo de ensaio e também das amostras, podem ser vistos na Tabela 3.3. Variação entre 55 e 85 μm foram aceitos para a escolha de amostras da mesma formulação C. De toda a forma, tais variações não chegam a comprometer os resultados, haja vista que as amostras C3, C8/C9 e C10 são avaliadas de forma independente. C7 e C11 são derivadas das amostras C3 e C10, respectivamente.

Tabela 3.3 – Detalhes das compressibilidades das amostras

Amostra	Valor de compressibilidade ISO 6310:2009 a frio e a 5 MPa (μm)
C3	62
C7	*
A1	34
A2	
C8	58
C9	
C10	84
C11	**

* Após o par de amostra C3 rodar o ensaio em dinamômetro e passar pelo processo de retífica da superfície, renomeou-se a amostra para C7.

** Após o par de amostra C10 rodar o ensaio em dinamômetro e passar pelo processo de retífica da superfície, para simular o desgaste irregular tangencial cruzado, renomeou-se a amostra para C11.

Além das amostras acima, para alguns ensaios foram utilizados blocos de aço confeccionados em SAE 1020 com geometria de uma pastilha para simular a condição de pastilhas novas de 30 mm (D) e simulando uma condição extrema de pastilha em fim de vida, somente a espessura da plaqueta de 9 mm (E).

O detalhamento das geometrias de cada uma das amostras e seus respectivos grupos podem ser vistas na Figura 3.3.

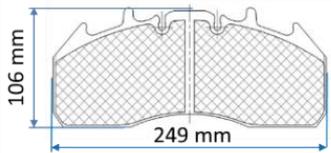
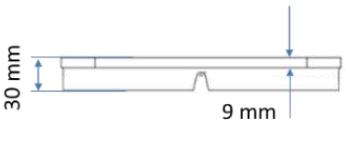
Amostra		
BLOCO DE AÇO Amostra E		
BLOCO DE AÇO Amostra D		
PASTILHA Amostra A e C		

Figura 3.3 – Detalhamento das geometrias das amostras usadas nas análises. [Fonte: o autor]

Para avaliar os 03 diferentes tipos de desgaste irregular analisados neste trabalho sem o efeito do material de atrito, ou seja, apenas o efeito da deformação do sistema de freio, utilizou-se de calibres de folga de 2,00 mm posicionados estrategicamente entre o disco e a face de contato dos blocos de aço D, afim de forçar a amostra a ficar inclinada. Dessa forma, para cada condição de desgaste avaliado, chamou-se o bloco de aço com um nome diferente: tangencial cruzado (D1), tangencial afunilado (D2) e desgaste radial (D3), como mostra a Figura 3.4.

A amostra C11, pastilha em material compósito, foi retificada de forma a ter as mesmas geometrias do desgaste irregular tangencial cruzado da amostra D1. Isso possibilitou a avaliação do efeito combinado do desgaste irregular, deformação do material de atrito e deformação do sistema de freio.

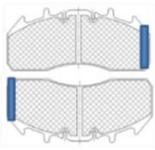
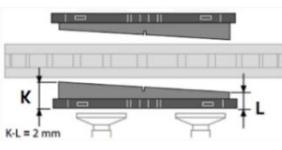
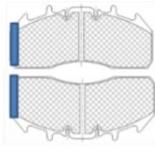
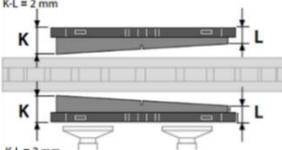
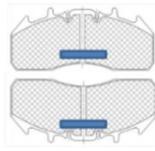
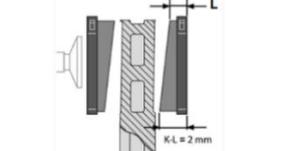
Amostra BLOCO DE AÇO	Posição dos calibres de folga de 2 mm	Simulação do desgaste irregular do tipo:	Imagem do freio com as amostras D1, D2 e D3
Amostra D1 desgaste tangencial cruzado			
Amostra D2 desgaste tangencial afunilado			
Amostra D3 desgaste radial			

Figura 3.4 – Descrição das amostras, posição dos calíperes de folga, tipo de desgaste irregular simulado e imagem do freio com as amostras D1, D2 e D3. [Fonte: o autor]

3.4 Métodos de Análise

Para atingir os objetivos do trabalho, dois procedimentos serão utilizados, em alguns casos de forma isolada (apenas o procedimento 1) e em outras de forma combinada (Procedimento 1 e o Procedimento 2). Além dos 2 procedimentos acima, existe também uma etapa de inspeção da pastilha, que é realizada antes e após o grupo de ensaios, com o objetivo de caracterizar o valor do *stroke* em função da condição da superfície e *bulk* da pastilha.

Inicialmente serão explicados cada um dos procedimentos, após será descrito o método de inspeção das pastilhas e, por fim, a combinação dos procedimentos através de 3 grandes grupos de ensaios com seus devidos objetivos e amostras que serão utilizadas.

Procedimento 1 – Procedimento de avaliação de *free stroke* e flexibilidade (PAFF):

Objetivo: Através da medição do valor do *stroke*, antes e/ou após ensaios em dinamômetro, caracterizar o valor da folga entre disco e pastilha (*free stroke*) e a flexibilidade da matriz do material de atrito (*bulk*) com a pastilha ainda instalada no freio, após a realização da operação de auto-ajuste do sistema de freio.

Esse procedimento é importante para a avaliação do comportamento do mecanismo de auto-ajuste do freio a disco em função dos diversos efeitos que serão explorados nesse trabalho. É uma forma de avaliação da compatibilidade entre a pastilha de freio com o mecanismo de auto-ajuste do freio.

Primeiramente, o sistema de freios deve estar desregulado (manualmente) com folga acima de 1,80 mm entre pastilha e disco e temperatura estabilizada nesses componentes abaixo de 50 °C. São realizadas 50 aplicações de freio a 2 bar de pressão de acionamento da câmara de freio com o rotor (disco) na posição parada. Após as 50 aplicações de auto-ajuste, ainda com o disco parado, realiza-se o *check* de *stroke* através dos acionamentos de freio de números 50, 51 e 52, conforme descrito abaixo:

- Acionamento de número 50 e 52 (2 e 8 bar): Realiza-se um acionamento a 2 bar (acionamento 50) e a 8 bar (acionamento 52), e, baseado no dado obtido de *stroke*, avalia-se a flexibilidade do material ou do sistema, principalmente para observar as diferenças entre as formulações, e também para avaliar os efeitos da variação da flexibilidade da estrutura do material de atrito abaixo da superfície (*bulk*).
- Acionamento de número 51: É realizado com uma aplicação de 0,6 bar, pressão suficiente para tirar o êmbolo da câmara do repouso (*threshold*, explicado por Day, 2014), e eliminar a folga entre disco e pastilha para dar o primeiro contato com a pastilha. É então medido o valor de *stroke*, pois o valor obtido com essa leve pressão de acionamento será considerado como sendo o curso livre do freio (*free stroke*).

De forma resumida, pode-se ver o procedimento conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Procedimento de avaliação do *free stroke* e flexibilidade (PAFF)

Procedimento de avaliação de <i>free stroke</i> e flexibilidade (PAFF)			
Acionamento #	Sequência de teste	Pressão (bar)	Nº total de acionamentos
1 a 49	Auto-ajuste	2	49
50	Flexibilidade @ 2 bar	2	1
51	<i>Free stroke</i> @ 0,6 bar	0,6	1
52	Flexibilidade @ 8 bar	8	1

Todas as aplicações são realizadas na condição estática com temperatura < 50 °C

Procedimento 2 - Testes dinâmicos em dinamômetro:

Objetivo: O ensaio dinâmico tem como função submeter o material de atrito a uma situação real de aplicação no freio, onde a sua estrutura passará por diversos ciclos térmicos e mecânicos. Essa situação gera desgaste da superfície do material de atrito e uma possível alteração da rigidez da camada inferior a superfície do material de atrito (*bulk*), bem como a própria rigidez da superfície. Ao longo de todo ensaio dinâmico existe o monitoramento e registro do *stroke*, porém, a avaliação será dada conforme descrito no procedimento a seguir.

O procedimento 2 trata-se de uma adaptação do procedimento original chamado TR Pads de 26 de outubro de 2018, conforme pode ser visto no APÊNDICE B. Este procedimento conta com diversas etapas e rotina de testes, porém, para esse trabalho, a etapa mais relevante é a de sensibilidade à temperatura. Nessa etapa, submete-se as pastilhas de freios a temperaturas elevadas, tendo as frenagens controladas pela temperatura do disco, o qual contava com um termopar embutido a 3 mm da superfície e exatamente no raio efetivo, ou seja, no centro da pista de contato com a pastilha interna. As frenagens iniciam-se a 100, 200, 300, 400, 500 e 600 °C de temperatura no disco, com as pressões de acionamento da câmara variando entre 1 a 10 bar. Nesta etapa do procedimento, a fim de separar os efeitos da velocidade sobre a pastilha, executam-se as frenagens a 60 km/h ou 100 km/h, porém, para cada velocidade deve-se utilizar novas amostras, bem como realizar o procedimento 2 por completo.

O *stroke* é medido ao longo de todo teste e durante a frenagem. Assim, a medida que ocorre a variação da pressão de acionamento da câmara de freio, ocorre a variação do valor de *stroke*, sendo possível monitorar e registrar toda a evolução da curva de *stroke* dentro de uma frenagem. Para a maioria dos comparativos deste trabalho, será utilizado o valor de pico máximo do *stroke* dentro da frenagem, ainda com o disco girando. Além disso, no momento da execução das frenagens, é possível extrair o valor de *free stroke*, da mesma forma como foi explicado no item 2.1.2 e na Figura 2.7. Esse valor será útil para avaliar o comportamento do mecanismo de ajuste do freio ao longo da etapa de sensibilidade à temperatura.

Os pontos de avaliação de *stroke* se deram em apenas 02 temperaturas de acionamento, em 100 °C e 400 °C. Tanto para a velocidade de 60 km/h, quanto para a velocidade de 100 km/h, foram registrados 10 pontos, de 1 a 10 bar de pressão de acionamento, a 100 °C e outros 10 pontos a 400 °C, formando a curva de *stroke* (mm) *versus* pressão de acionamento (bar).

Essa etapa de sensibilidade à temperatura, bem como os pontos de avaliação do *stroke*, podem ser vistos na Tabela 3.5 e Tabela 3.6 abaixo, sendo as mesmas correspondentes às velocidades de 60 e 100 km/h, respectivamente.

Tabela 3.5 – Procedimento 2 – Teste dinâmico em dinamômetro – 60 km/h

Teste		Pressão de acionamento	Velocidade Inicial	Velocidade Final	Temperatura Inicial	Quantidade	Ponto de Avaliação
Nº	Descrição da etapa	(bar)	(km/h)	(km/h)	(°C)	frenagens	(<i>stroke</i>)
Etapa de sensibilidade a temperatura executado a 60 km/h							
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	100	10	
41	Teste de Performance	1 to 10	60	0	100	10	X
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	200	10	
45	Teste de Performance	1 to 10	60	0	200	10	
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	300	10	
49	Teste de Performance	1 to 10	60	0	300	10	
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	400	10	
53	Teste de Performance	1 to 10	60	0	400	10	X
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	500	10	
57	Teste de Performance	1 to 10	60	0	500	10	
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	600	10	
61	Teste de Performance	1 to 10	60	0	600	10	

Tabela 3.6 – Procedimento 2 – Teste dinâmico em dinamômetro – 100 km/h

Teste		Pressão de acionamento	Velocidade Inicial	Velocidade Final	Temperatura Inicial	Quantidade	Ponto de Avaliação
Nº	Descrição da etapa	(bar)	(km/h)	(km/h)	(°C)	frenagens	(<i>stroke</i>)
Etapa de sensibilidade a temperatura executado a 100 km/h							
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	100	10	
43	Teste de Performance	1 to 10	100	0	100	10	X
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	200	10	
47	Teste de Performance	1 to 10	100	0	200	10	
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	300	10	
51	Teste de Performance	1 to 10	100	0	300	10	
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	400	10	
55	Teste de Performance	1 to 10	100	0	400	10	X
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	500	10	
59	Teste de Performance	1 to 10	100	0	500	10	
-	Aquecer + Estabilizar	10	60	0	600	10	
63	Teste de Performance	1 to 10	100	0	600	10	

Inspeção – Dimensionamento da espessura da pastilha:

Objetivo: Durante a execução do grupo de ensaios 2 e 3 (que serão detalhados a seguir) inspeções no início e fim dos ensaios foram realizadas, em etapas estratégicas (que serão detalhados nos próximos tópicos, e assim, ficará mais claro os momentos quando são

realizadas as inspeções), a fim de medir o nível de desgaste parcial (avaliação do nível de desgaste do material de atrito) e o desgaste irregular (avaliação do tipo de desgaste/irregularidade da superfície) gerados em função da execução do procedimento 1. Isso é feito para cada uma das pastilhas (interna e externa). Com isso é possível avaliar se existem relações entre o desgaste parcial e irregular (obtidos com a inspeção) com os valores de *free stroke* e flexibilidade do material de atrito (obtidos com o procedimento 1 - PAFF).

A medição das pastilhas internas e externas é feita de forma individual e basicamente trata-se da medição da espessura total da pastilha (plaqueta + material de atrito) por meio de um micrômetro (Marca Mitutoyo 0 a 25 mm ou 25 a 50 mm). Isso é feito em 8 pontos ao longo da superfície de cada pastilha antes e após a execução do grupo de ensaios. Os pontos 1, 3, 5 e 7 estão na parte inferior da pastilha (região de apoio dentro do cáliper) e os pontos 2, 4, 6 e 8 estão na parte superiores da pastilha (região que fica no lado oposto ao do apoio do cáliper). As medições são realizadas a 5 mm da extremidade (pontos 1, 2, 7 e 8) e entre 5 a 10 mm da linha de centro da pastilha (pontos 3, 4, 5 e 6). Na Figura 3.5, pode-se ver a posição dos 8 pontos de medição detalhadamente, bem como o sentido de cada um dos pontos dimensionados, iniciando no sentido de giro do disco. Com base nesses dados, temos:

- Desgaste parcial: Deve-se fazer a média de todos os valores obtidos através da diferença dos valores iniciais e finais de espessura obtidos em cada ponto. Com o desgaste médio em cada pastilha, realiza-se a média da pastilha interna e externa para se obter o valor de desgaste parcial para o par de amostra em análise.
- Desgaste irregular: Através da diferença dos valores iniciais e finais de espessura em cada um dos 8 pontos de cada pastilhas, faz-se a diferença entre o valor máximo e mínimo. Com isso, obtém-se o valor de desgaste irregular em cada pastilha. Faz-se a média entre o desgaste irregular de cada pastilha para obter o valor de desgaste irregular para o par de amostra em análise.

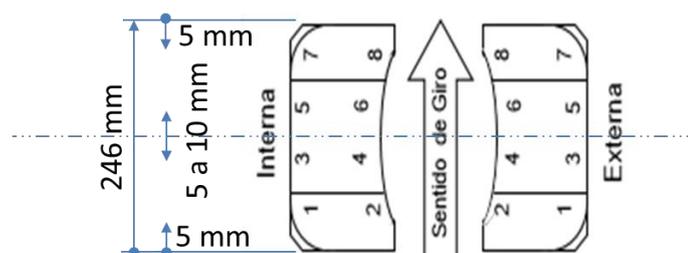


Figura 3.5 – Disposição dos 8 pontos de medição para inspeção das pastilhas. Fonte: o autor

Por fim, com base nesses dados, será possível traçar os gráficos de perfil de desgaste, a fim de caracterizar o tipo de desgaste obtido ao final do teste.

Para a avaliação dos 06 objetivos do trabalho, 3 grupos de ensaios foram criados. Cada grupo irá utilizar suas respectivas amostras, e possuem uma sequência de testes pré-estabelecidos para que ao final sejam possíveis extrair as respostas para os 06 objetivos específicos do trabalho. Na Figura 3.6 é apresentado de forma resumida a configuração dos grupos 1 (com as amostras C10, C11, D, D1, D2, D3, E e os objetivos 5 e 6), o grupo 2 (com as amostras C8, C9, A1 e A2 com os objetivos 1, 2 e 3) e por fim o grupo 3 (com amostras C3, C7 e o objetivo específico 4). O objetivo 3 será obtido com o uso da amostra D e A2 por meio de uma análise complementar.

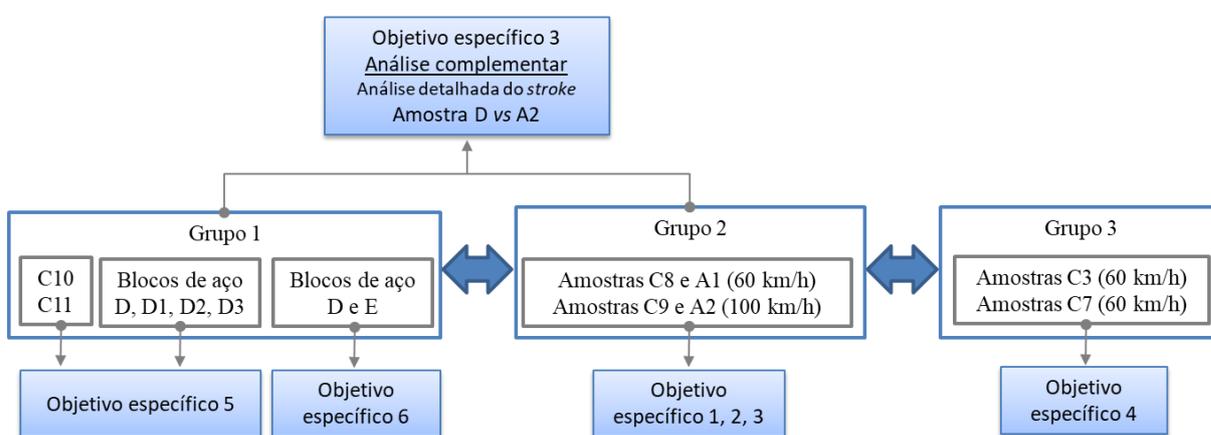


Figura 3.6 – Grupos de ensaios e os respectivos objetivos específicos avaliados. Fonte: o autor

De forma detalhada, abaixo seguem as descrições de cada um dos 03 grupos de ensaios, os seus objetivos, tipos de amostras utilizadas e também os fluxogramas com os procedimentos utilizados.

➤ Grupo 1 (G1):

Por meio do procedimento 1 (PAFF) e com o uso de amostras de aço e de amostras de pastilha de compósito, pretende-se alcançar os objetivos específicos de número 5 (Efeito de 03 tipos de desgaste irregular) e 6 (Efeito de início e fim de vida da pastilha). O PAFF G1.1 será utilizado para avaliar o objetivo específico 5 e o PAFF G1.2 para o objetivo específico 6, como mostra o fluxograma com a sequência de ensaios descrito na Figura 3.7. As saídas desse procedimento serão os valores de *stroke* a 2, 0,6 e 8 bar.

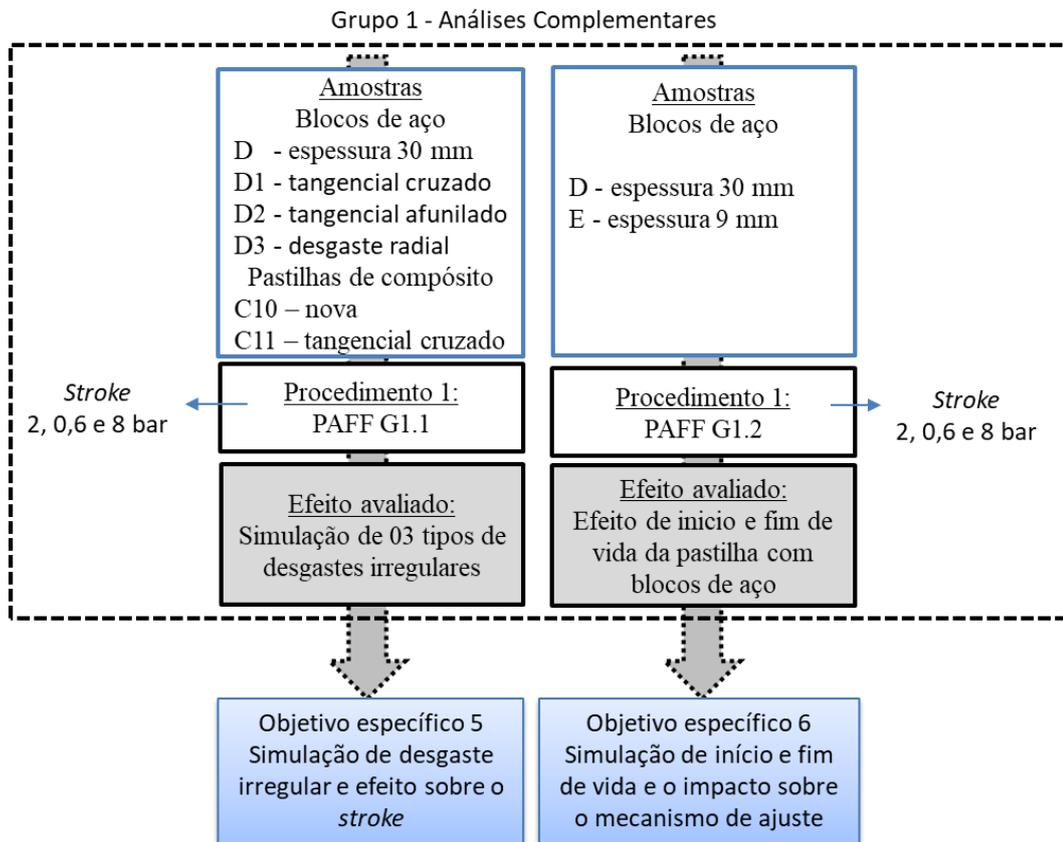


Figura 3.7 – Fluxograma do grupo de ensaios 1. [Fonte: o autor]

➤ **Grupo 2 (G2):**

Esse grupo de testes será utilizado para esclarecer o objetivo específico de número 1 (Efeito da velocidade sobre o *stroke*), número 2 (efeito da temperatura sobre o *stroke*) e por fim o número 3 (Efeito do desgaste irregular da superfície do material de atrito sobre o *free stroke* e variação da flexibilidade do *bulk*).

Para ser possível isolar o efeito da formulação e velocidade, para cada velocidade de ensaio novas amostras foram utilizadas, ou seja, para 60 km/h (Amostras C8 e A1) e para 100 km/h (Amostras C9 e A2). Além disso, para cada velocidade, toda a sequência descrita pelo G2 é repetida. Ou seja, com 2 velocidades (60 e 100 km/h) e 2 formulações (A e C), 4 repetições dos ensaios do G2 foram necessárias.

O G2 trata-se de uma sequência que combina o procedimento 1 e 2, descritos anteriormente, com etapas de inspeções no início e final de cada teste, conforme descrito a seguir: executa-se o procedimento 1 (PAFF G2 – Amostra C8 e A1 / C9 e A2 - inicial),

após realiza-se o procedimento 2 (Testes em dinamômetro, sendo executado a 60 km/h ou 100 km/h) e por fim, finaliza-se com o procedimento 1 (PAFF G2 – Amostra C8 e A1 / C9 e A2 - final). O fluxograma com a sequência é descrito na Figura 3.8.

Os objetivos 1 e 2 são extraídos diretamente dos resultados obtidos durante a execução do procedimento 2. Já os resultados para avaliação do objetivo 3 é extraído da comparação entre o resultado da inspeção inicial e PAFF G2 inicial com a inspeção final e PAFF G2 final. Existe também a análise complementar do objetivo 3, detalhada das curvas de *stroke* para avaliação complementar do objetivo 3, que trata-se de avaliar detalhadamente as curvas instantâneas de *stroke* (na linha do tempo da frenagem), comparando os resultados dos acionamentos 50, 51 e 52 do PAFF do Grupo 2 (PAFF G2 da amostra A2 inicial e final a 100 km/h) com os resultados do PAFF do Grupo 1 (PAFF G1 da amostra D - bloco de aço).

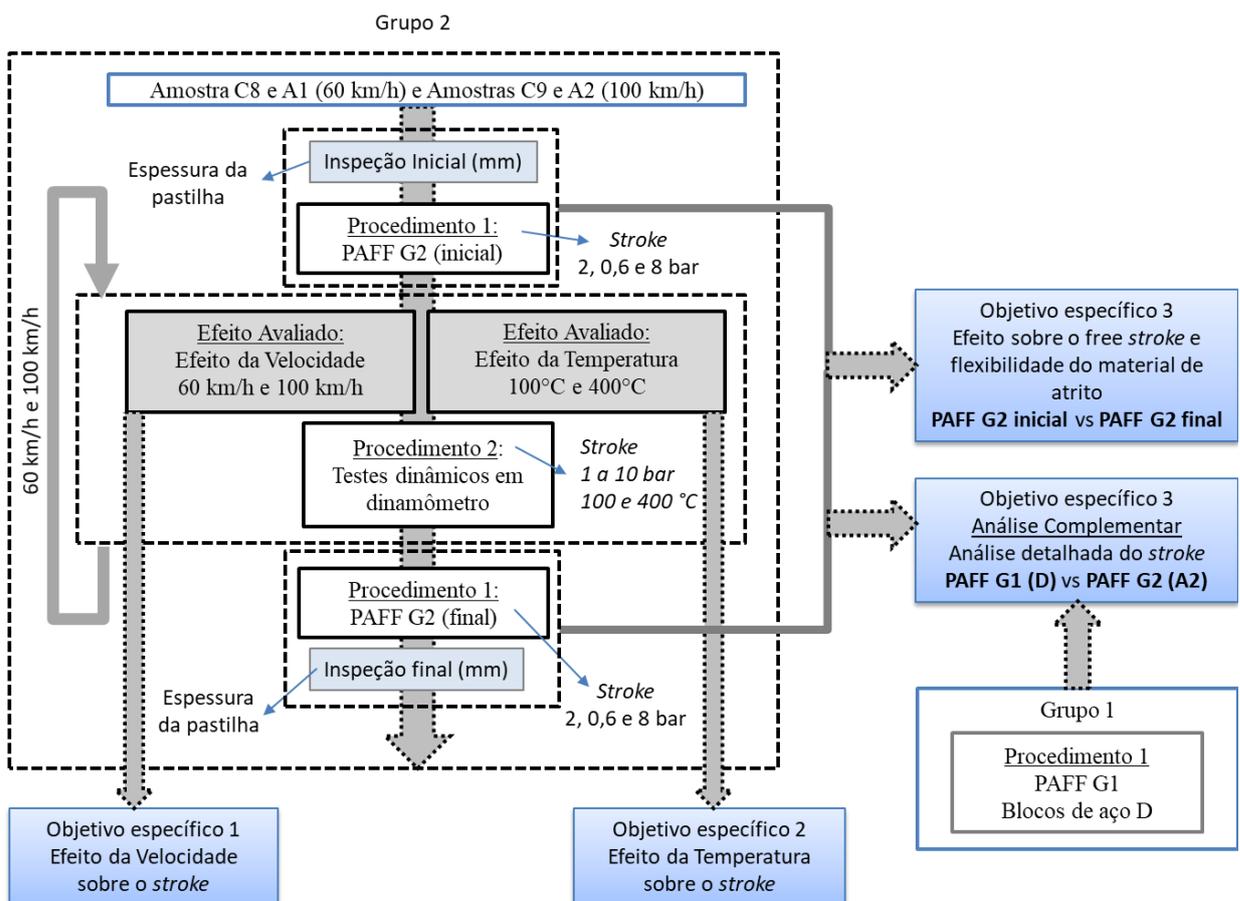


Figura 3.8 – Fluxograma do grupo de ensaios 2. [Fonte: o autor]

➤ **Grupo 3 (G3):**

Com esse grupo de testes, pretende-se alcançar o objetivo específico de número 4 (Relação de contribuição percentual do efeito do desgaste irregular da superfície e do efeito da variação da flexibilidade do material de atrito abaixo da superfície - *bulk*). Esse objetivo é um pouco diferente do número 2, haja vista que aqui neste caso, estaremos isolando o ensaio em apenas uma única velocidade, de 60 km/h, e apenas uma única formulação C. A estratégia para isolar os efeitos da superfície e de *bulk* é descrito abaixo:

Por meio da combinação dos 2 procedimentos (procedimento 1 e 2) acima descritos e com etapas de inspeções no início e final de cada teste, realizou-se a seguinte sequência de testes: Realizou-se uma inspeção inicial da amostra C3, após submeteu-se o par de amostra C3 ao procedimento 1 (PAFF G3 - Amostra C3 inicial), após realizou-se o procedimento 2 (testes em dinamômetro, sendo executado a 60 km/h) e por fim finalizou-se com o procedimento 1 (PAFF G3 – Amostra C3 final). Retificou-se as amostras C3, a fim de homogeneizar a superfície e manter a característica de *bulk* degradado. Essas amostras foram chamadas de C7. Da mesma forma, repetiu-se a sequência acima, com a Amostra C7: Realizou-se uma inspeção inicial da amostra C7, após submeteu-se o par de amostra C7 ao procedimento 1 (PAFF G3 - Amostra C7 inicial), após realizou-se o procedimento 2 (Testes em dinamômetro, sendo executado a 60 km/h) e por fim finalizou-se com o procedimento 1 (PAFF G3 – Amostra C7 final). As saídas desse procedimento são os dados de espessura das pastilhas (a fim de avaliar o desgaste parcial e irregular) e o valor de *stroke* nas etapas de PAFF. O procedimento 2 será utilizado apenas para gerar o efeito de desgastes parcial, irregular, ciclos térmicos e mecânicos que tendem a alterar a rigidez do material de atrito, porém, não serão avaliados dados de *stroke* nessa etapa. O fluxograma é descrito na Figura 3.9.

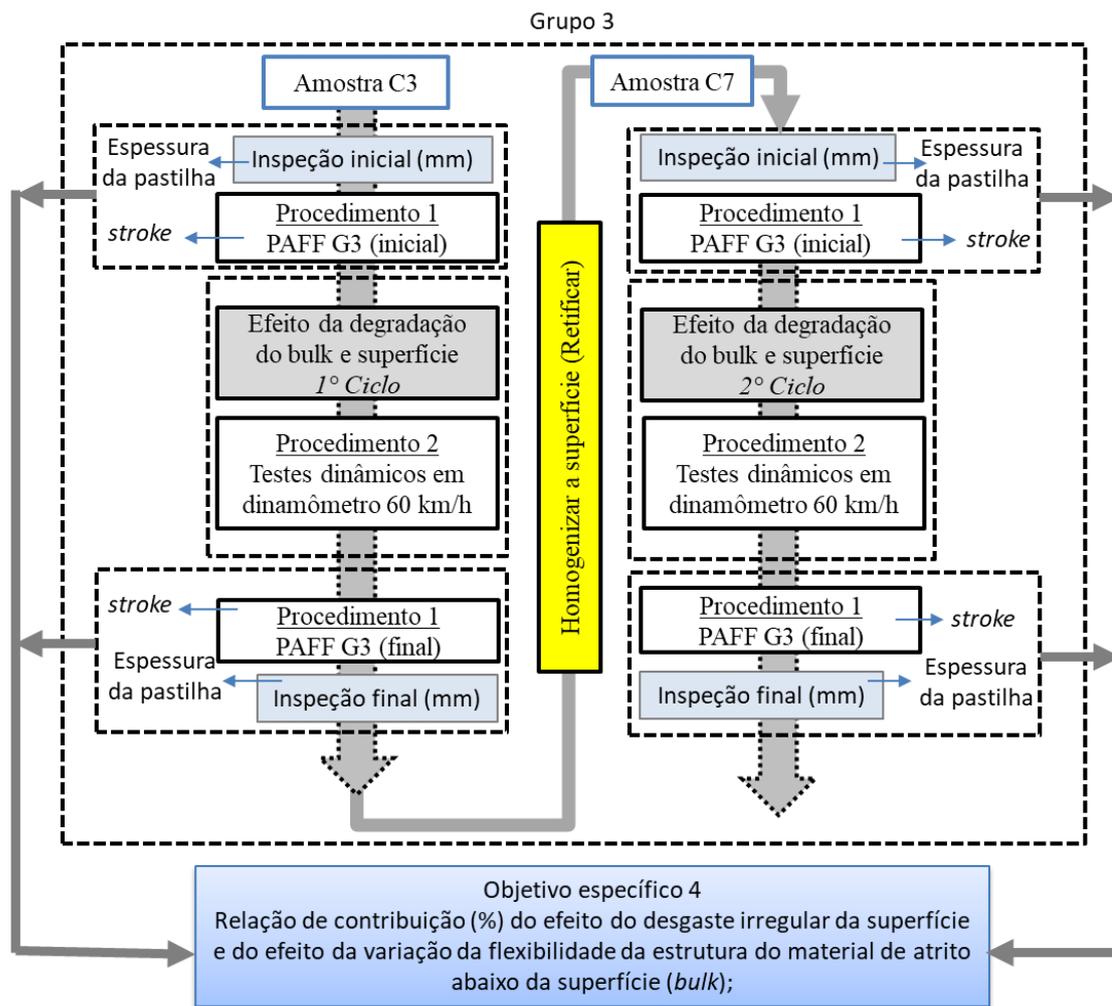


Figura 3.9 – Fluxograma do grupo de ensaios 3. [Fonte: o autor]

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, por meio dos 03 grupos de ensaios definidos no capítulo anterior, são apresentados os resultados da avaliação da influência sobre o *stroke*. Por meio do **Grupo 1**, com o uso de blocos de aço e de um par de pastilhas de compósito da formulação C, apresentam-se os resultados do efeito dos 03 tipos de desgaste irregular avaliados (objetivo 5), bem como os resultados do efeito de início e fim de vida do material de atrito (objetivo 6). Pelo **Grupo 3**, com o uso de amostras da formulação C, apresentam-se os resultados da relação de contribuição (%) do efeito do desgaste irregular da superfície e do efeito da variação da flexibilidade da estrutura do material de atrito abaixo da superfície – *bulk*

(objetivo 4). Pelo **Grupo 2**, com o uso de amostras das 2 formulações A e C, os resultados do efeito do uso da velocidade de 60 ou 100 km/h (objetivo 1), do efeito da temperatura durante os ensaios - avaliados a 100 e 400°C (objetivo 2) e o efeito do desgaste irregular da superfície do material de atrito sobre *free stroke* e variação da flexibilidade do *bulk*; (objetivo 3). Com relação a este último item, os resultados da análise complementar são apresentados, cruzando os dados obtidos no Grupo 2 - amostra A2 e Grupo 1 - amostra D (objetivo 3 – análise complementar). A ordem de apresentação dos resultados dos objetivos específicos seguirá a seguinte ordem: objetivo específico 5, 6, 4, 3, 1 e 2.

4.1 Efeito do desgaste irregular da pastilha sobre o *stroke* (objetivo 5)

Neste tópico, serão primeiramente serão caracterizados os efeitos de alguns tipos de desgaste irregular que tipicamente são encontrados após testes de dinamômetro e também na própria aplicação do material de fricção na sua condição normal e real de utilização. Em função da utilização de calibres de folga para representar o desgaste em cunha nas amostras D1, D2 e D3 torna impossível deixar a mesma folga inicial de 1,8 mm entre pastilha e pistão. Por essa razão, na Figura 4.1, pequenas variações no valor de *stroke* no acionamento 1 é esperado. Porém, isso não é problema, visto que já foi evidenciado em outros ensaios que mesmo com folgas iniciais diferentes e com o mesmo tipo de material, dentro de 50 aplicações o sistema é capaz de estabilizar em um nível de *stroke* similar.

Na Figura 4.1 tem-se o gráfico de PAFF G1.1, o qual teve o seu procedimento explicado na Tabela 3.4. O auto-ajuste é realizado a 2 bar e correspondem aos acionamentos de 1 a 49, a análise de flexibilidade é realizada pela medição de *stroke* a 2 e 8 bar (acionamentos 50 e 52) e a análise do *free stroke* é executado com uma pressão baixa, 0,6 bar, suficiente para deslocar os pistões sem deformar a pastilha (acionamento 51). No gráfico estão contemplados os resultados dos blocos de aço: D (superfície homogênea com 30 mm de espessura), D1 (desgaste tangencial cruzado), D2 (desgaste tangencial afunilado) e D3 (desgaste radial) e pastilha em material compósito: C10 (pastilha de compósito nova com superfície próxima a uma condição homogênea, similar ao bloco de aço D) e C11 (pastilha de compósito retificada com desgaste do tipo irregular tangencial cruzado, similar ao bloco de aço D1). Analisando as curvas de auto-ajuste durante a execução do PAFF G1.1, pode-se

verificar que a estabilização do sistema ocorre em diferentes níveis de *stroke* no acionamento de número 50 a 2 bar.

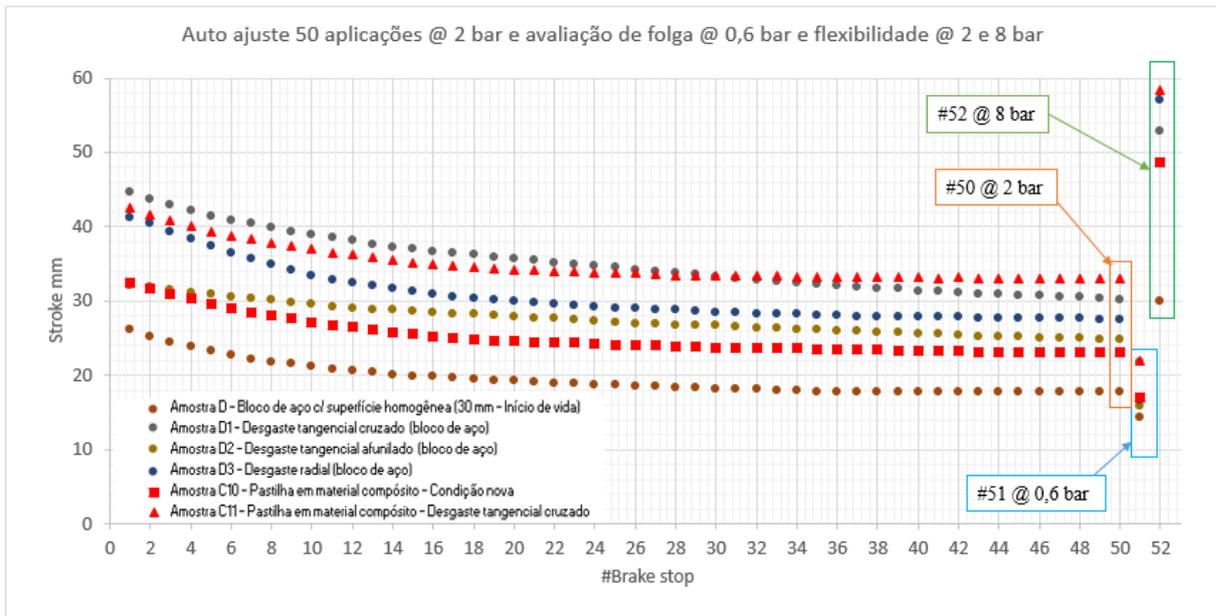


Figura 4.1 – Resultados de PAFF G1.1 para as pastilhas D, D1, D2 e D3

Através da Figura 4.2, avaliam-se detalhadamente cada um dos resultados nos acionamentos 50, 51 e 52, conforme será explanado a seguir.

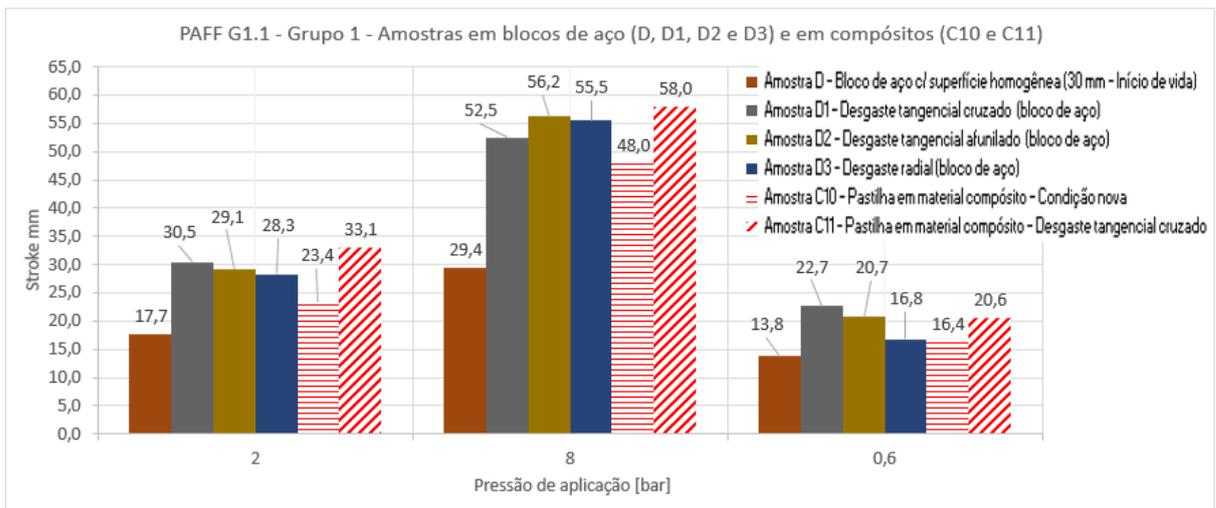


Figura 4.2 – Resultados de PAFF G1.1 de flexibilidade do sistema a 2 e 8 bar e de *free stroke* a 0,6 bar para pastilhas D, D1, D2 e D3

Ao se avaliar os resultados dos blocos de aço D, D1, D2 e D3, pode-se ver claramente que os desgastes irregulares aumentam os valores de *free stroke* (0,6 bar) e o valor do *stroke* (2 e 8 bar). No caso dos ensaios com os blocos de aço, as medições de *stroke* a 2 e 8 bar avaliam a flexibilidade do sistema, ou seja, o quanto o cáliper deforma, haja vista que não há praticamente nenhuma deformao do bloco de aço ($\Delta L = 0,0017$ mm para $E = 210000$ MPa, $L = 30$ mm e pressão de contato sobre a área de $183,6$ cm² a 10 bar = 11,8 MPa). Assim, primeiramente, ao se avaliar o *free stroke*, tomando como referência o bloco de aço D (13,8 mm, em 0,6 bar), verifica-se um acréscimo de 64% em relao ao D1 – tangencial cruzado (22,7 mm), 50% em relao ao D2 – tangencial afunilado (20,7 mm) e 21,7% em relao ao D3 – radial (16,8 mm). Em seguida, tomando como referência a amostra de bloco de aço D (17,7 mm a 2 bar e 29,4 mm a 8 bar), a 2 bar, o crescimento no valor do *stroke* representa um aumento de aproximadamente 72% para o D1 (30,5 mm), 64% para o D2 (29,1 mm) e 60% para o D3 (28,3 mm). A 8 bar, verificou-se um acréscimo de aproximadamente 79% para D1 (52,5 mm), 91% para D2 (56,2 mm) e 89% para o D3 (55,5 mm).

Tomando como exemplo o acionamento a 2 bar com a amostra D1, conforme pode-se ver na Figura 4.3, um pistão toca muito antes (*running clearance* = 0) que o outro pistão (*running clearance* > 0) (Figura 4.3d), e todo sistema de freio tende a sofrer uma forte torço. Tomando como referência a linha vermelha em relao ao cáliper e quantidade de flechas vermelhas sendo a folga entre a linha e o cáliper, pode-se ver que na condio de repouso (Figura 4.3a) tem-se 3 flechas, na condio de início de contato com pistão (em torno de 22 mm) ocorre uma sutil reduo para 2 flechas (Figura 4.3b), e por fim, na condio de máximo *stroke* a 2 bar (em torno de 30 mm) o cáliper deforma e tem forte torço dos seus componentes até a acomodao (Figura 4.3c), aumentando o nível de *stroke*.

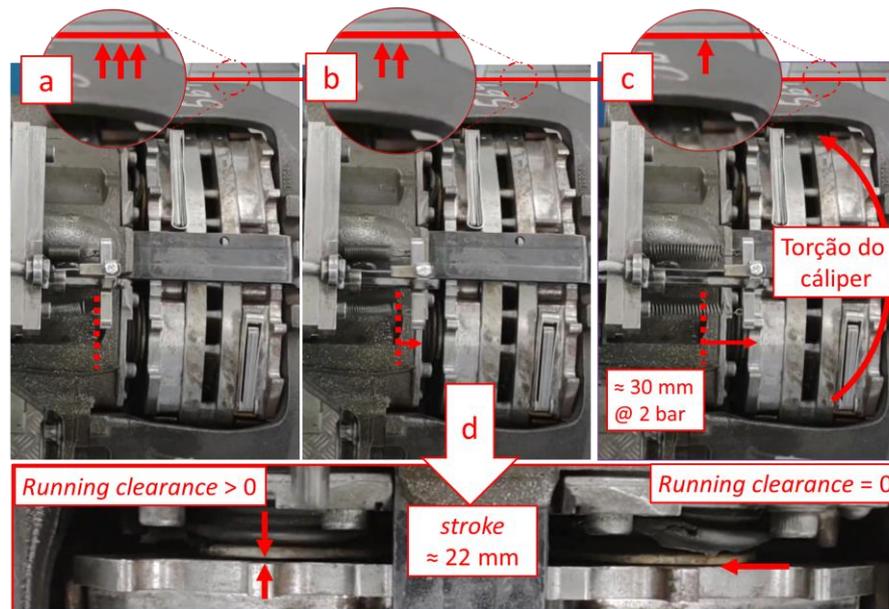


Figura 4.3 – a) condição de repouso do freio, b) momento em que ocorre o contato do pistão na amostra D1 e início de torção do calíper, c) forte torção do calíper e acomodação do sistema, d) detalhamento do momento do contato de um dos pistões antes que o outro

Em função desse contato irregular entre os pistões, a pior condição para o *free stroke* (0,6 bar) fica por conta do desgaste tangencial cruzado (D1), com 22,7 mm. Efeito similar acontece com o desgaste tangencial afunilado (D2), porém, apesar de apresentar o valor mais alto de *stroke* a 8 bar, apresenta um resultado intermediário em termos de *free Stroke*, com 20,7 mm.

É importante ressaltar que a amostra D3 (desgaste radial), apesar de apresentar níveis tão elevados quanto os demais (D2 e D1) de *stroke* a 2 e 8 bar (30,5, 29,1, 28,3 mm a 2 bar e 52,5, 56,2 55,5 mm a 8 bar para D1, D2 e D3, respectivamente), ainda é capaz de garantir um valor de *free stroke* de 16,8 mm, muito mais próximo do valor de 13,8 mm obtido com o bloco de aço (D) de superfície homogênea. Nesse caso, como pode-se ver na Figura 4.4, mesmo com a pastilha inclinada radialmente, ambos os pistões tocam juntos a amostra D3 (Figura 4.4d) e desarmam o mecanismo de ajuste por igual. É possível observar na condição de repouso (Figura 4.4a) e no início de toque dos pistões com a amostras D3 (Figura 4.4b) que não há afastamento entre a linha vermelha (referenciada sobre a linha do *hardware* - eixo) e a câmara de freio, apenas a partir desse momento que pode-se observar a torção do calíper, um aumento do afastamento entre a câmara e a linha vermelha (Figura 4.4c) e consecutivamente um aumento considerável do *stroke* a 2 e 8 bar.

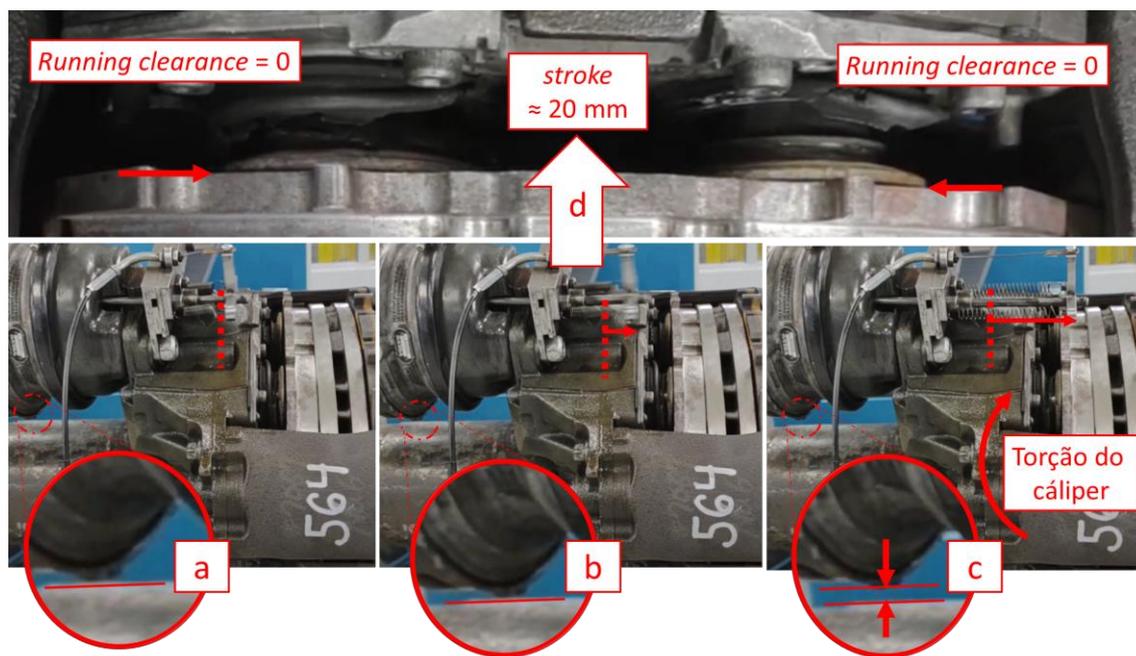


Figura 4.4 – Momento em que ocorre o toque do pistão na amostra D3 e torção do cáliber.

Dessa forma, fica claro que ao acionar o freio equipado com blocos de aço, isolando o efeito da deformação do material de atrito, a condição de superfície irregular tende a gerar grande deformação no sistema mecânico, que consecutivamente representa em aumento de *stroke* tanto para a etapa de medição do *free stroke* (medido em 0,6 bar), quanto para o aumento do *stroke* em função da deformação do sistema como um todo (medido através da flexibilidade do sistema a 2 e 8 bar).

Agora, ao se avaliar o efeito sobre uma pastilha de material compósito da formulação do tipo C, na condição nova (C10) e comparar com o resultado da pastilha retificada com a geometria ajustada para a condição de desgaste tangencial cruzado (C11), observa-se um aumento de *stroke* de C10 para C11 de aproximadamente 41% (de 23,4 para 33,1 mm) a 2 bar e de 20% (de 48,0 para 58,0 mm) a 8 bar. Já para o *free stroke* observa-se um acréscimo de 26% (de 16,4 para 20,6 mm). Dessa forma, pode-se ver que tanto o *stroke* a 2 e 8 bar (que é proporcional a flexibilidade do sistema e pastilha), quanto o *free stroke* (0,6 bar) sofrem um acréscimo considerável também com as pastilhas de material compósito.

Ainda analisando a Figura 4.2, é importante realizar um paralelo comparando as condições de pastilhas de material compósito com os respectivos blocos de aço. Realizando primeiramente a análise da flexibilidade a 2 e 8 bar de C10 e C11 vs D e D1, observa-se que:

- Ao comparar o bloco de aço (D) com uma respectiva pastilha de compósito nova (C10), com superfície próxima a uma condição de desgaste ideal e homogêneo, observa-se a 2 bar um aumento de 17,7 mm (D) para 23,4 mm (C10), um acréscimo de 32 % no *stroke*. A 8 bar, o *stroke* passa de 29,4 mm (D) para 48 mm (C10), que representa um acréscimo de 63 % no *stroke*.
- Agora ao comparar um bloco de aço com desgaste tangencial cruzado (D1) com a sua respectiva pastilha de compósito (C11), observa-se a 2 bar um aumento de 30,5 mm (D1) para 33,1 mm (C11), representando um acréscimo de 9 % no *stroke*. E a 8 bar, um aumento de 52,5 mm (D1) para 58 mm (C11), o que corresponde a um acréscimo de 10 % no *stroke*.

Em suma, tomando a condição de superfície homogênea como referência, a 2 e 8 bar, o freio equipado com uma pastilha de material compósito tem o acréscimo % de *stroke* de C10, superfície homogênea, para a C11, com desgaste irregular tangencial cruzado, menor do que o acréscimo % de *stroke* obtido do freio equipado com um bloco de aço D, superfície homogênea, para ao freio equipado com o bloco de aço D1, desgaste irregular tangencial cruzado. A hipótese é que ao ser comprimido contra o disco, o material compósito deforma o suficiente para compensar parte da deformação do sistema de freio. Assim, a torção no sistema de freio é menor do que com o bloco de aço e o *stroke* não chega aos mesmos níveis obtidos com o bloco de aço.

Realizando agora a análise do *free stroke* a 0,6 bar de C10 e C11 vs D e D1, pode-se constatar que:

- Quando comparado a amostra de aço (D) com uma correspondente pastilha de compósito nova (C10), com superfície próxima a uma condição de desgaste ideal e homogêneo, observa-se a 0,6 bar, um aumento de 13,8 mm (D) para 16,4 mm (C10), um acréscimo de 19 % no *free stroke*.
- Agora ao comparar um bloco de aço com desgaste tangencial cruzado (D1) com a sua respectiva pastilha de compósito (C11), observa-se a 0,6 bar, uma redução de 22,7 mm (D1) para 20,6 mm (C11), um decréscimo de 10 % no *free stroke*.

Na condição do desgaste irregular tangencial cruzado, a hipótese para explicar o menor *free stroke* de C11 em relação ao bloco de aço D1, é que durante o acionamento do

freio um dos pistões toca muito antes o bloco de aço D1, e como o bloco de aço é extremamente rígido, o mecanismo de ajuste desarma um pouco antes e o *free stroke* é maior para D1. Dessa forma, pode-se dizer que materiais de atrito com menor compressibilidade (como por exemplo o da formulação A) tenderiam a apresentar maiores *free stroke* do que os de maior compressibilidade (como por exemplo o da formulação C) em caso de níveis similares de desgastes irregulares.

4.2 Efeito do início e fim de vida da pastilha sobre o *stroke* (objetivo 6)

Durante a operação em veículo, a pastilha, juntamente com o disco tende a gastar e a redução de espessura acontece. Uma análise de desgaste foi realizada por Santos, 2019, porém, naquela oportunidade, não foi avaliado o efeito do desgaste no comportamento do auto-ajuste do freio. Dessa forma, o objetivo dessa análise é avaliar o efeito do início e fim de vida sobre o *stroke* durante todo o procedimento de PAFF G1.2, isolando o efeito do material de atrito. Assim, para essa análise, com o disco parado, utilizaram-se os blocos de aço D e E, simulando a condição de início e fim de vida, respectivamente. De fato, a intenção é saber se o mecanismo de ajuste do freio tende a apresentar diferenças ou variações de comportamento em diferentes momentos da vida do material de atrito, ou seja, em diferentes posições do cáliper flutuante.

Conforme a Figura 4.5, verifica-se que a variação de posição do cáliper, em uma situação de início para fim de vida, tende a não afetar no resultado do nível de *stroke* ao final das 50 aplicações de auto-ajuste (realizadas a 2 bar) e nem mesmo o valor de *free stroke* (realizado a 0,6 bar). Uma pequena diferença é observada a 8 bar, sendo levemente maior para a amostra simulando o fim de vida (E). Em geral, o perfil da curva de auto-ajuste segue praticamente o mesmo perfil, mostrando que o início e fim de vida não afetam ou mudam o comportamento do mecanismo de ajuste e, conseqüentemente, o valor de *stroke*.

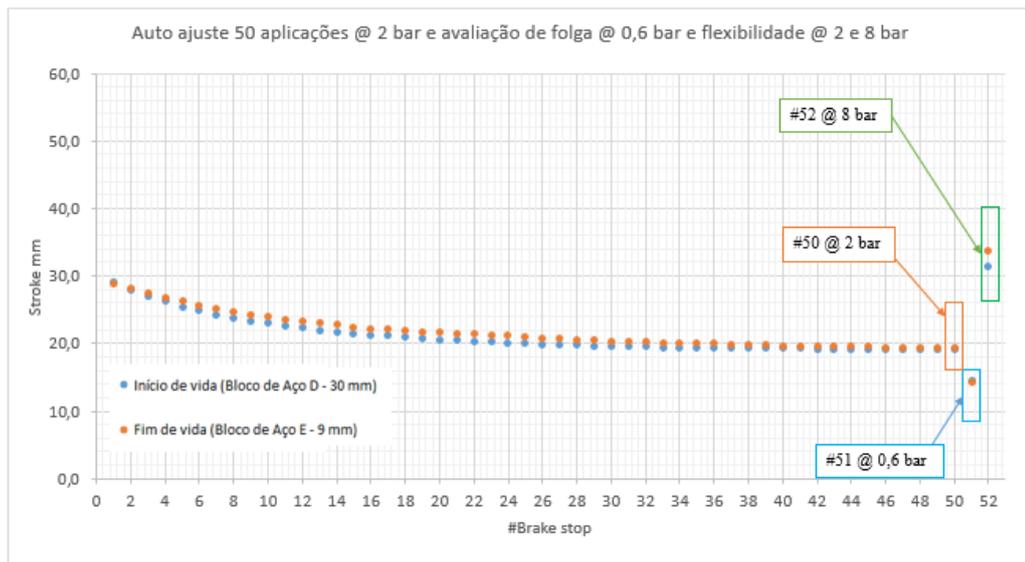


Figura 4.5 – Resultados de PAFF G1.2 para o sistema em início (D) e fim de vida (E)

Analisando detalhadamente os resultados a partir da Figura 4.6, verifica-se que o *free stroke* varia menos de 1% (sai de 14,7 mm com amostra D e chega a 14,8 mm com amostra E). Avaliando o efeito da deformação do sistema, por meio da análise da flexibilidade a 2 bar, pode-se ver um aumento de menos de 3% (sai de 19,5 mm com amostra D e chega a 20,0 mm com amostra E). Já a deformação do sistema, por meio da análise de flexibilidade a 8 bar, é evidentemente maior conforme o fim de vida se aproxima, saindo de 31,4 mm, na amostra D, para 34,2 mm, na amostra E. Isso representa um acréscimo de 9% no valor de pico de *stroke*. Isso corrobora com o que havia sido evidenciado por Santos et al, 2021.

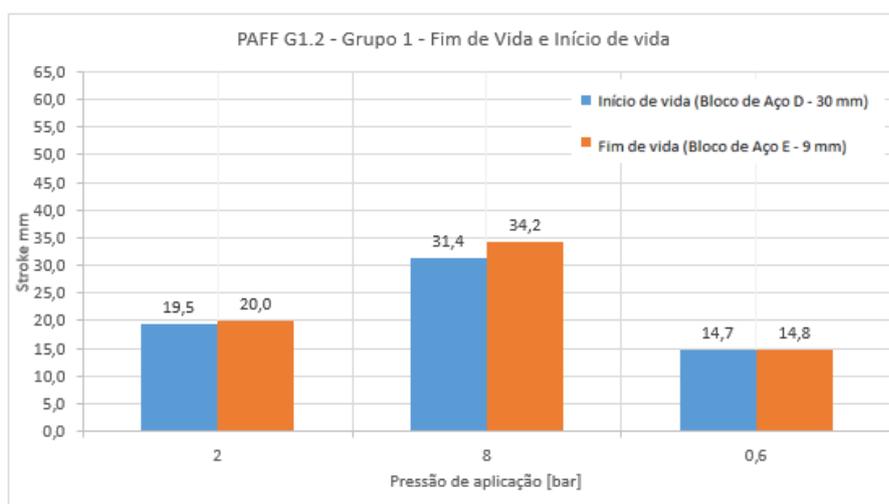


Figura 4.6 – Resultados de PAFF G1.2 de flexibilidade do sistema a 2 e 8 bar e de *free stroke* a 0,6 bar para o sistema em início de vida (D) e fim de vida (E).

4.3 Relação de contribuição do efeito de *bulk* e superfície (objetivo 4)

Para chegar a relação de contribuição percentual do efeito da variação da flexibilidade de *bulk* e o efeito do desgaste irregular da superfície, deve-se avaliar individualmente o efeito da variação da flexibilidade da estrutura do material de atrito abaixo da superfície (*bulk*) sobre o *stroke* e o efeito do desgaste irregular da superfície sobre o *stroke*. Por meio do grupo de ensaios 3 (G3), primeiramente será realizada a avaliação das curvas de *stroke* obtidas durante o PAFF G3 com a amostra C3 na condição inicial (antes do ensaio em dinamômetro) e final (após ensaios em dinamômetro) e C7 na condição inicial (após ter sido retificada e antes do ensaio) e final (após ensaios em dinamômetro), conforme descrito anteriormente no fluxograma do grupo 3. Nesta análise, não serão analisados os resultados de *free stroke* e desgaste irregular, haja vista que isso será tratado no item 4.4.1. Serão verificados apenas os dados de *stroke* (para a avaliação da flexibilidade a 2 e 8 bar) e também os dados de desgaste parcial (obtidos durante a inspeção).

Por meio do PAFF G3, pode-se verificar na Figura 4.7, que existem diferenças de *stroke* que levam a diferenças no perfil de auto-ajuste do freio durante os acionamentos de 1 a 50 a 2 bar. Em geral, as pastilhas com superfícies mais homogêneas (condição inicial) tendem a ter a curva de auto-ajuste, finalizado o acionamento 50 a 2 bar, com níveis menores de *stroke*, como é o caso da curva do material C3 inicial e C7 inicial.

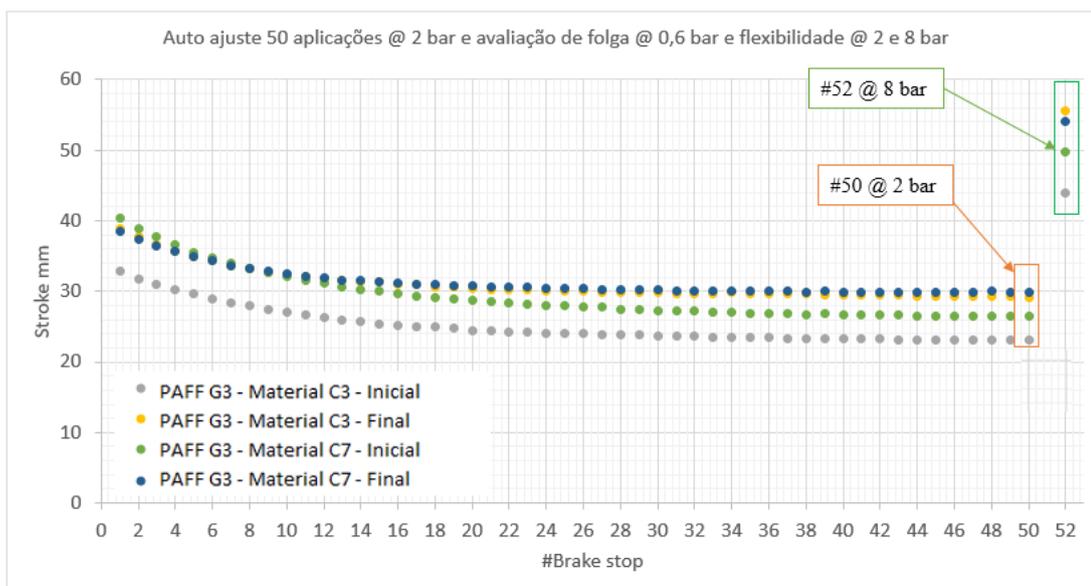


Figura 4.7 – PAFF G3 do Grupo 3 a 60 km/h (C3 e C7) – Inicial e final

Através da análise da flexibilidade da pastilha a 2 bar e com o auxílio da Figura 4.8, pode-se ver no detalhe que o nível de estabilização do *stroke*, na aplicação número 50 a 2 bar, do material C3 inicial (23 mm) não é recuperado totalmente após a retífica e o material C7 inicial (26 mm), mesmo com a superfície do material de atrito retificada para torná-la homogênea, ainda assim fica em um patamar superior de *stroke* nessa mesma aplicação número 50, em torno de 3 mm acima. Esse é um efeito de bulk, que é representado pela seta em azul e a área hachurada no gráfico da Figura 4.8. O restante da diferença de 26 mm para 29 é referente ao efeito de superfície, que é representado pela seta em vermelho no mesmo gráfico. Ambos efeitos influenciam simultaneamente no nível do *stroke*. Esse efeito pode também ser verificado a 8 bar. A relação de contribuição de cada um dos efeitos de *bulk* e superfície será tratado ao final deste tópico.

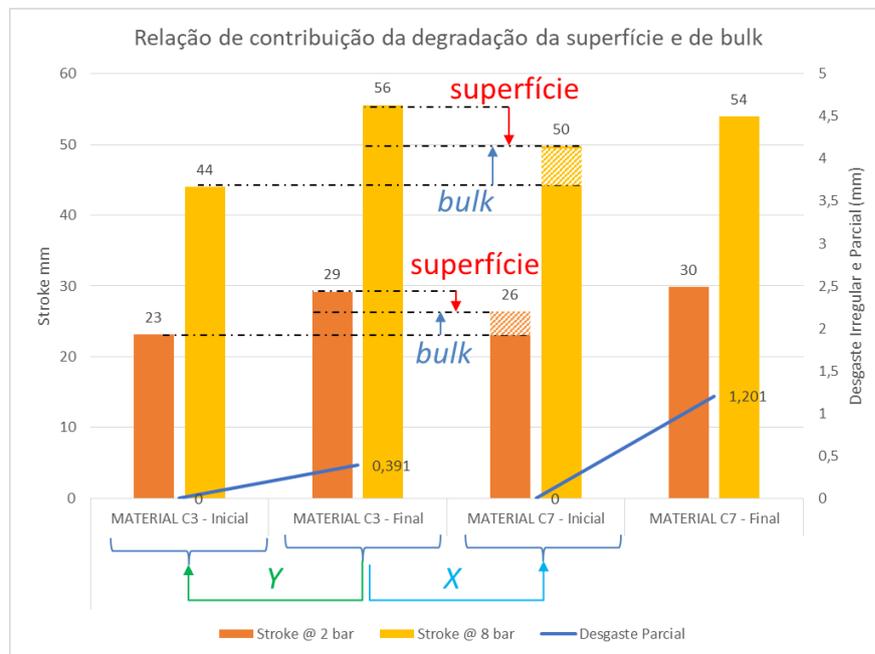


Figura 4.8 – Relação entre os resultados do PAFF G3 e das inspeções a 60 km/h (C3 e C7)

Obs.: valores de X e Y mostrados no gráfico serão explicados a seguir.

Ainda avaliando os dados da Figura 4.8, ao verificar os resultados após a segunda passagem pelo procedimento 2 a 60 km/h, pode-se verificar alguma influência do nível de desgaste da pastilha, ou seja, redução de espessura, sobre os resultados. No acionamento número 50 a 2 bar, o nível de *stroke* do material C7 final (30 mm) é muito similar ao C3 no final (29 mm), já a 8 bar, observou-se uma redução de 56 mm (C3 final) para 54 mm (C7 final).

Os efeitos de redução de espessura do material de atrito ao longo do ensaio não são possíveis de serem excluídos da medição, haja visto que a única forma de se realizar a degradação do bulk e superfície é através do procedimento dinâmico.

Realizar a medição da compressibilidade das pastilhas após a retífica normalmente apresentam variações significativas, haja visto que a área da pastilha que fica em contato com o equipamento de medição dificilmente se torna tão plana quanto a condição de pastilha nova e isso acaba comprometendo o resultado. Uma alternativa para analisar a rigidez da pastilha é realizar a medição da dureza Gogan, o qual é realizada em 6 pontos sobre a superfície da pastilha em uma área de contato menor do que a usada no ensaio de compressibilidade, e isso ajuda a compensar as variações na área de contato da pastilha. Dessa forma, por meio do procedimento descrito no APÊNDICE B, realizou-se a medição da dureza Gogan da amostra C3 antes do teste e também da amostra C7 logo após a retífica. Materiais com dureza Gogan mais alta, são mais flexíveis. O desgaste gerado em cada pastilha, após o primeiro ciclo pelo procedimento 2, foi de 0,196 (0,391 mm / 2) mm. Já o consumo do material devido a retífica, foi de aproximadamente 5 mm, totalizando em torno de 5,2 mm por pastilha. Assim, a dureza Gogan passou de 48 GC (C3 inicial) para 53 GC (C7 inicial, após a retífica), representando um aumento de 10% na dureza Gogan.

Dessa forma, fica evidente que mesmo com a redução de espessura da pastilha, o material do *bulk* da pastilha ainda assim apresenta uma maior flexibilidade do que a condição inicial. Em outras palavras, se fosse possível degradar o bulk sem reduzir a espessura da pastilha, possivelmente a contribuição do bulk seria mais expressiva do que a contribuição da superfície, já que sua espessura seria maior e, considerando a mesma força de aplicação do equipamento, um maior deslocamento (maior compressibilidade) seria observado.

Outro efeito que também tem influência sobre a relação de contribuição é o efeito do calíper. Como já apresentado por Santos et al, 2021, quanto maior o deslocamento do calíper, em função do consumo do material de atrito, maior é o stroke. Os autores mostram que ao rebaixar o material novo C1 em 18 mm (tornando-se o material C4), uma redução de 18% no stroke foi observada. Os autores também mostram que ao usar blocos de aço (sem efeito de compressibilidade das pastilhas), um aumento de 29% no stroke é evidenciado. Em outras palavras, o aumento da rigidez da pastilha com a redução da espessura tende a minimizar o efeito de aumento de stroke em função da deformação do calíper.

Dessa forma, desprezando os efeitos de deformação do cáliber conforme o fim de vida da pastilha se aproxima, bem como o aumento de rigidez da pastilha conforme reduz-se a espessura, a relação de contribuição percentual (RC%) do efeito de *bulk* e superfície pode ser avaliado por meio do seu efeito sobre a flexibilidade do material a 2 e 8 bar e definida pelo cálculo de *X* e *Y* em mm, conforme apresentado na Figura 4.8 e conforme as Equações 4.1 e 4.2, respectivamente, sendo:

$$C3_{final} - C7_{inicial} = X \quad (4.1)$$

$$C3_{final} - C3_{inicial} = Y \quad (4.2)$$

E por fim, a relação de contribuição de cada parcela da superfície e *bulk*, por meio das Equações 4.3 e 4.4:

$$RC\%_{Superfície} = X/Y \cdot 100 \quad (4.3)$$

$$RC\%_{Bulk} = 100 - RC\%_{Superfície} \quad (4.4)$$

Relação de contribuição do efeito de superfície e *bulk* a 2 bar:

$$C3_{final,2bar} - C7_{inicial,2bar} = X = 29 - 26 = 3 \text{ mm},$$

$$C3_{final,2bar} - C3_{inicial,2bar} = Y = 29 - 23 = 6 \text{ mm e assim,}$$

$$RC\%_{Superfície@2bar} = 3/6 = 0,5 \cdot 100 = 50\% \text{ e}$$

$$RC\%_{Bulk@2bar} = 50\%.$$

Relação de contribuição do efeito de superfície e *bulk* a 8 bar:

$$C3_{final,8bar} - C7_{inicial,8bar} = X = 56 - 50 = 6 \text{ mm},$$

$$C3_{final,8bar} - C3_{inicial,8bar} = Y = 56 - 44 = 12 \text{ mm e assim,}$$

$$RC\%_{Superfície@8bar} = 6/12 = 0,5 \cdot 100 = 50\% \text{ e}$$

$$RC\%_{Bulk@8bar} = 50\%.$$

Em suma, pode-se verificar que a relação de contribuição de *bulk* e superfície para o material C3 é de 50 % para cada uma das parcelas analisadas tanto para 2, quanto para 8 bar. Apesar disso, deve-se sempre ter em mente que a redução da espessura da pastilha acaba por minimizar a contribuição do *bulk*, ou seja, a parcela do *bulk* poderia ser ainda maior do que a da superfície, se fosse possível desmembrar tais efeitos.

4.4 Efeito dinâmico sobre o *free stroke* e flexibilidade (objetivo 3)

Os resultados obtidos serão divididos em dois tópicos, um para cada velocidade de execução do ensaio. Pela análise do PAFF G2 (com a amostra C8 e A1) serão apresentados os resultados a 60 km/h e pela análise do PAFF G2 (com a amostra C9 e A2) serão apresentados os resultados a 100 km/h.

4.4.1 Avaliação da velocidade de 60 km/h

Avaliando o PAFF G2 inicial (C8 e A1), conforme pode-se ver na Figura 4.9, o perfil da curva de auto-ajuste segue um comportamento similar e também ao final do auto ajuste, no acionamento 50 a 2 bar, estabiliza em um nível de *stroke* bastante similar. Já avaliando o PAFF G2 final, a amostra C8 estabiliza em um patamar levemente acima do que a amostra A1 na mesma condição. A1 apresenta pouca variação sobre o *stroke* do início para o fim a 60 km/h.

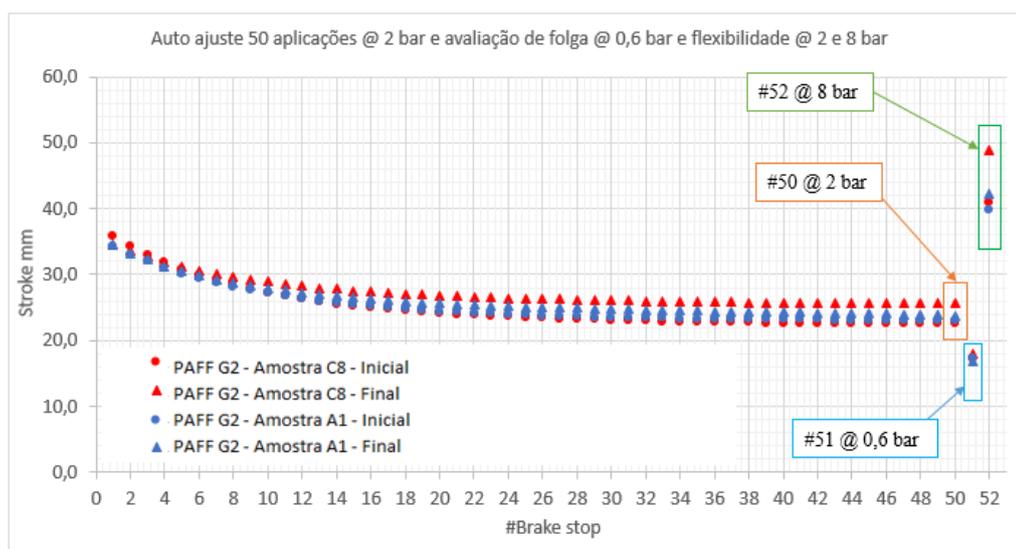


Figura 4.9 – PAFF G2 - Grupo 2 a 60 km/h (C8 e A1) – Inicial e final

Pela Figura 4.10, pode-se ver que a 60 km/h a amostra A1 não é tão sensível ao efeito de *bulk* e superfície após teste quanto a amostra C8, isso porque existe grande similaridade entre o nível de *stroke* da amostra A1 no início (23 mm e 40 mm, 2 e 8 bar, respectivamente) e ao final (24 mm e 42 mm, 2 e 8 bar, respectivamente), representando um aumento de 4 %. Já a amostra C8 apresenta uma variação mais considerável entre o início (23 mm e 41 mm, 2 e 8 bar, respectivamente) e final (26 mm e 49 mm, 2 e 8 bar, respectivamente), representando 13 % e 20 % a 2 e 8 bar, respectivamente. Além de percentualmente o aumento do *stroke* da amostra C8 ser maior, o nível também é maior do que a A1, principalmente ao final do ensaio, com 42 mm para A1 e 49 mm para C8, ambos a 8 bar, cuja a diferença é de 17 %.

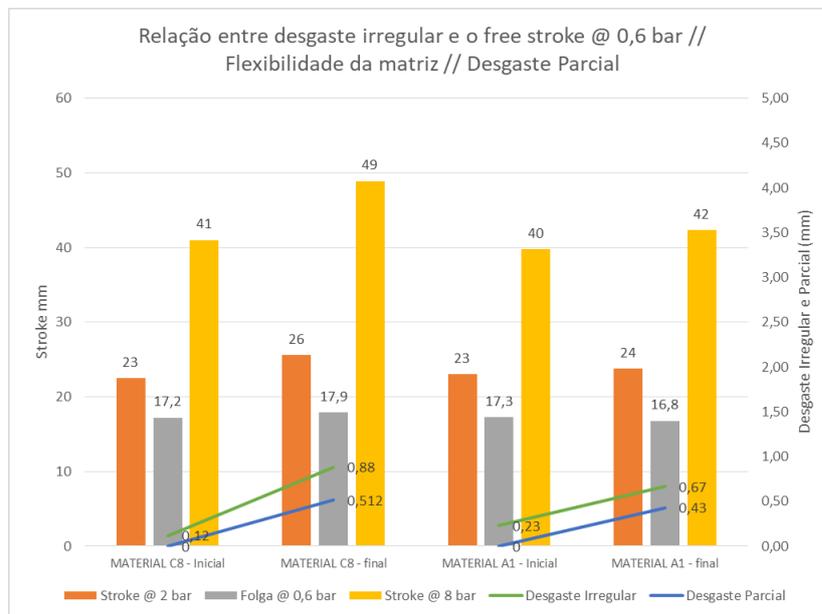


Figura 4.10 – Relação entre os resultados do PAFF G2 e das inspeções a 60 km/h (C8 e A1)

Ainda avaliando a Figura 4.10, o nível de desgaste parcial e de desgaste irregular nessa etapa a 60 km/h não é tão elevada (linhas do gráfico). O material C8 apresentou um desgaste parcial de 0,51 mm e o material A1 em torno de 0,43 mm. Da mesma forma o desgaste irregular foi de 0,88 e 0,67 mm para C8 e A1, respectivamente. Esses valores são consideravelmente inferiores aos valores máximos recomendados pelos fabricantes de sistemas ADB. Assim, esse nível de desgaste não é capaz de interferir de forma significativa nos valores de *free stroke* do freio após o auto-ajuste, mesmo após passar por todas etapas de

temperatura. Assim, os valores foram todos muito similares no início e fim de teste, sendo de 17,2 e 17,9 mm para C8 e de 17,3 e 16,8 mm para A1.

Pela Figura 4.11, para a análise do tipo de perfil, toma-se como referência a posição das pastilhas a contar do lado de entrada do sentido de giro do disco, como sendo o ponto 1 (superior) e 2 (inferior), a 0 mm, e no lado de saída do sentido de giro do disco, como sendo o ponto 7 (superior) e 8 (superior), a 246 mm. Nessa análise, para ambas formulações A e C, o desgaste do tipo radial foi mais pronunciado nas pastilhas do lado externo, ou seja, com um maior afastamento entre a linha verde “cheia” e a linha “pontilhada”. O perfil de desgaste tangencial tende a ser do tipo cruzado, porém, muito discreto e até difícil de ser identificado. Em geral, durante a execução do PAFF G2 a 60 km/h, o maior efeito sobre o *stroke*, entre as duas formulações A e C, é em função da menor compressibilidade da formulação A, representando menores níveis de *stroke* a 2 e 8 bar do que a formulação C.

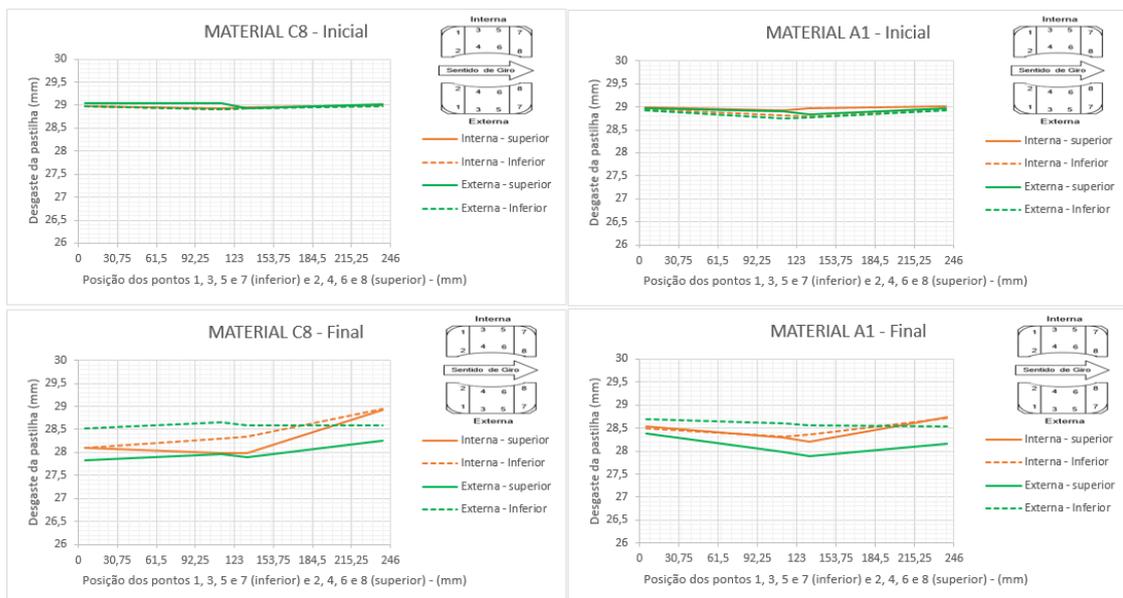


Figura 4.11 – Perfil de desgaste das pastilhas após ensaios do G2 a 60 km/h

4.4.2 Avaliação da velocidade de 100 km/h

Avaliando o PAFF G2 inicial das amostras C9 e A2, Figura 4.12, verifica-se que os perfis das curvas de auto-ajuste são similares para ambas formulações na condição de pastilha nova, com o nível de *stroke* sendo levemente maior para o C9. Já ao final do teste, o patamar de

ambos sobe com relação a condição inicial e ambas formulações terminam por estabilizar em níveis similares de *stroke* a 2 bar na 50ª aplicação de freio.

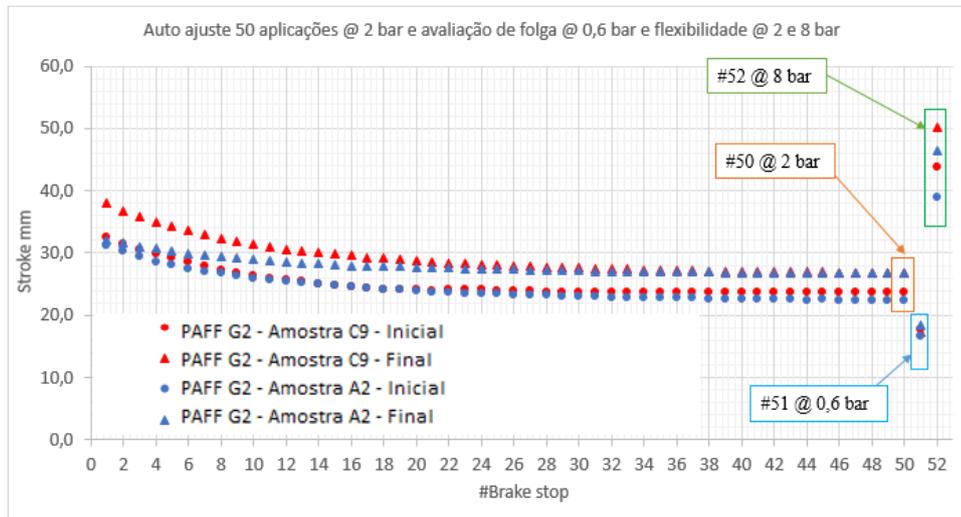


Figura 4.12 – PAFF do Grupo 2 a 100 km/h (C9 e A2) – Inicial e final

Na velocidade de 100 km/h, diferente do que foi visto a 60 km/h, ambos os materiais apresentam um efeito de *bulk* e de superfície mais acentuados. Pela Figura 4.13, a amostra A2 no início (22 mm e 39 mm, 2 e 8 bar) e ao final (27 mm e 46 mm, 2 e 8 bar), representando um aumento 23% e 18%, respectivamente. Já a amostra C9 apresenta uma variação mais considerável entre o início (24 mm e 44 mm, 2 e 8 bar) e final (27 mm e 50 mm, 2 e 8 bar), representando 13% e 14% a 2 e 8 bar, respectivamente. Apesar de percentualmente ter mostrado um acréscimo maior, o nível de *stroke* ao final do ensaio com material A1 foi de 46 mm e para o material C8 foi de 50 mm, ambos a 8 bar, ou seja, uma diferença de 9 %. Isso tem grande relação com as características de menor compressibilidade a frio do material A.

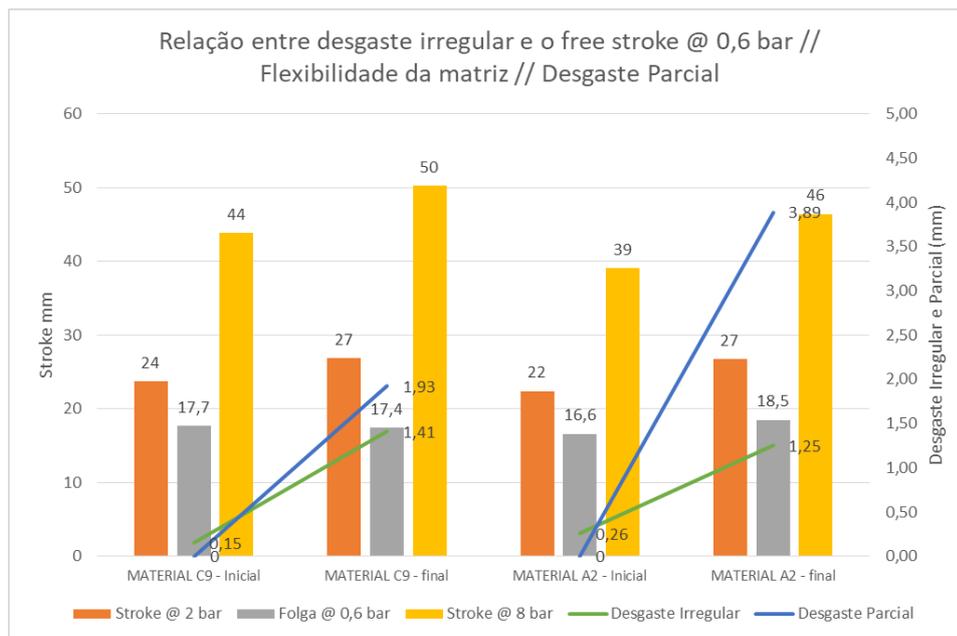


Figura 4.13 – Relação do desgaste irregular com o *free stroke* a 100 km/h

Ainda avaliando a Figura 4.13, verifica-se que o nível de desgaste parcial e de desgaste irregular (linhas do gráfico) nessa etapa a 100 km/h já é mais expressivo do que a 60 km/h. O desgaste parcial do material C9 é de 1,9 mm e do material A2 é de 3,9 mm. O desgaste irregular é similar, sendo de 1,4 mm para o material C9 e de 1,25 mm para o material A2, porém, com diferentes perfis de desgaste.

Pela Figura 4.14, para a análise do tipo de perfil, toma-se como referência a posição das pastilhas a contar do lado de entrada do sentido de giro do disco, como sendo o ponto 1 (superior) e 2 (inferior), a 0 mm, e no lado de saída do sentido de giro do disco, como sendo o ponto 7 (superior) e 8 (superior), a 246 mm. Nessa análise, para ambas formulações A e C, o desgaste do tipo radial foi mais pronunciado nas pastilhas do lado externo, ou seja, com um maior afastamento entre a linha verde “cheia” e a linha “pontilhada”. O perfil de desgaste tangencial tende a ser do tipo cruzado, já bem mais pronunciado do que a condição anterior a 60 km/h.

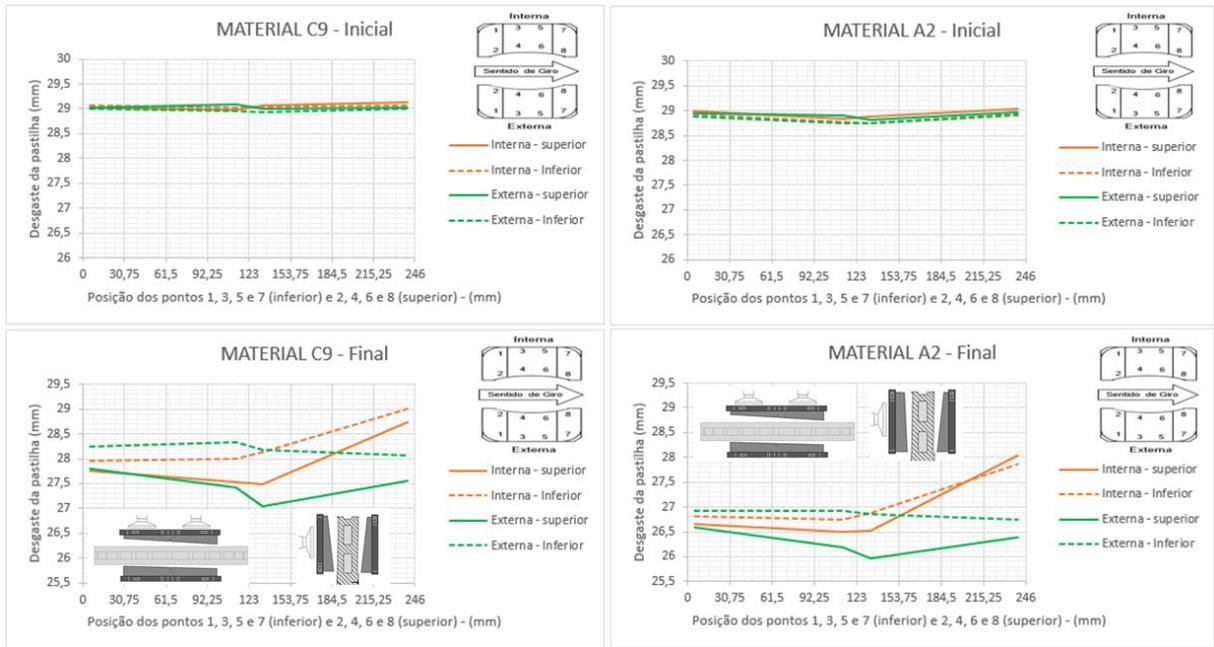


Figura 4.14 – Perfil de desgaste das pastilhas após ensaios do G2 a 100 km/h

Ainda pela Figura 4.13, essa condição de desgaste irregular não é capaz de interferir de forma significativa nos valores de *free stroke* para o material C9 (desgaste irregular = 1,4 mm), porém, o mesmo já não se pode afirmar para o material A2 (desgaste irregular = 1,2 mm) após a execução do PAFF G2 final, onde verificou-se um aumento de 1,9 mm de *free stroke*. Haja vista que os valores de desgaste irregular e perfil de desgaste são similares entre A e C, e que o desgaste parcial não afeta nessa etapa do ensaio (já que o freio passa por um auto-ajuste), entende-se que a menor compressibilidade do material A2 pode ser um fator que acaba acentuando o resultado de maior *free stroke*.

Fazendo um paralelo com o que foi comentado no item 4.1 e também o que foi apresentado na Figura 4.2, testes foram realizados com um material de atrito da família C, no caso o C11 com o mesmo nível de desgaste irregular do tipo tangencial cruzado (com os mesmos 2 mm de irregularidade) do bloco de aço D1. Foi possível verificar que o material de atrito C11 apresentou um valor de *free stroke* de 20,6 mm contra os 22,7 mm do bloco de aço D1. Ou seja, o material de atrito por ter uma maior compressibilidade do que o bloco de aço com superfície irregular (D1), tendeu a acomodar-se melhor e um valor de *free stroke* menor foi evidenciado. Esse mesmo efeito pode estar acontecendo com o material de atrito A2 e C9 após o teste. Já que A2 e C9 estão com níveis similares de desgaste irregular e perfil de desgaste similares (tangencial cruzado), a justificativa para um valor de *free stroke* mais

acentuado para o A2 no PAFF G2 final recai ao fato de dessa amostra ter menor compressibilidade do que o C9.

O resultado de um *free stroke* mais elevado na aplicação 51 a 0,6 bar após a estabilização do auto-ajuste (1 a 50 aplicações a 2 bar), significa que o pistão está tocando a pastilha e desarmando o mecanismo de ajuste antes mesmo do sistema ter se acomodado, ou seja, antes de toda a pastilha estar acomodada dentro da cáliber e consumido todas as folgas. Algumas vezes isso é muito sutil, variando poucos milímetros, ou até mesmo décimos. No entanto, pensando que isso pode acontecer dentro de uma frenagem, onde o desgaste é mais acentuado, ao desarmar o mecanismo de ajuste com uma pequena antecedência, significa estar deixando de regular alguns décimos de milímetros a cada frenagem. No final do ensaio, isso pode representar um acréscimo elevado de *stroke*, ainda mais para materiais que apresentam um desgaste parcial mais acentuado e ainda combinado com um desgaste irregular do tipo tangencial cruzado e menor compressibilidade como é o caso do material A2.

4.5 Efeito da velocidade e temperatura sobre o *stroke* (objetivo 1 e 2)

Avaliou-se, através dos dados obtidos pelo procedimento 2 (dentro do grupo de ensaios 3), os efeitos das velocidades sobre a resposta em *stroke* dinâmico, ou seja, com disco em movimento, em ambos os materiais. Pode-se ver claramente na Figura 4.15, que o efeito do aumento da velocidade em temperaturas de 100°C não representa um acréscimo tão expressivo de *stroke*. Para a formulação A, o *stroke* sai de 37 mm para 40 mm (aumento de 8%) a 8 bar. Para formulação C, sai de 41 mm para 42 mm (aumento de 2 %). Já o efeito do aumento da temperatura para a mesma velocidade de 60 km/h, os valores de *stroke* foram muito similares, tanto para 2 quanto para 8 bar, algumas vezes ficando até mais baixo devido ao ajuste do freio dentro das etapas de estabilização na seção de sensibilidade a temperatura. Ao avaliar o efeito do aumento da temperatura para a velocidade de 100 km/h, verificou-se um acréscimo mais expressivo. Para a formulação A, saindo de 21 mm para 29 mm (aumento de 38 %) e saindo de 40 mm para 56 mm (aumento de 40%) a 8 bar. Para a formulação C, saindo de 21 mm para 24 mm (aumento de 14%) a 2 bar e saindo de 42 mm para 49 mm (aumento de 16%) a 8 bar.

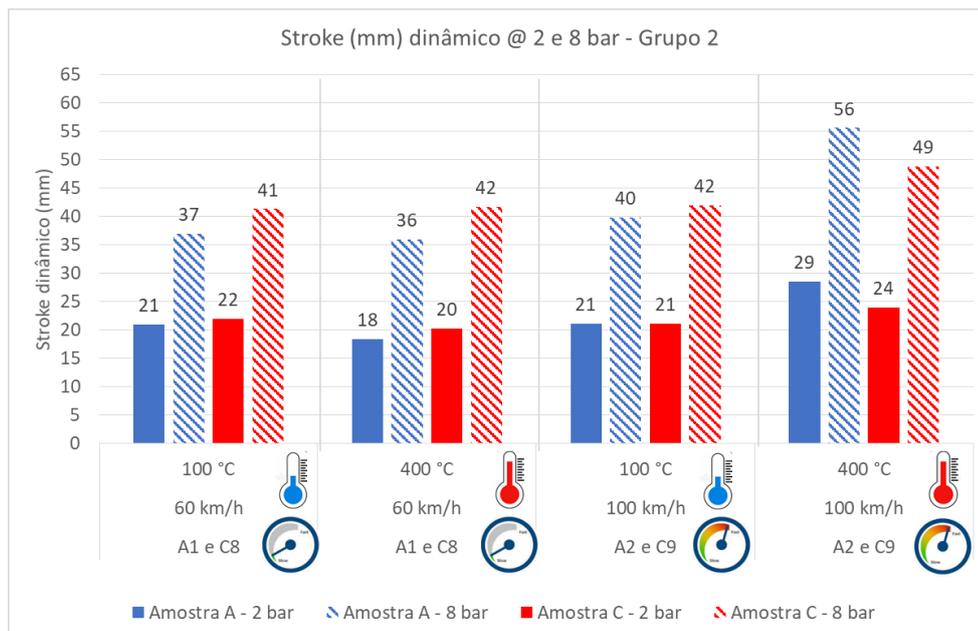


Figura 4.15 – *Stroke* dinâmico a 2 bar e 8 bar a 60 km/h (Amostra A1 e C8) e 100 km/h (Amostra A2 e C9)

Entre as temperaturas de 100°C e 400°C, apresentadas acima na Figura 4.15, existem outras etapas do ensaio que acabam influenciando no resultado do *stroke*. Na Figura 4.16 tem-se o gráfico de *stroke* em acionamentos a 1 bar de pressão em cada uma das temperaturas (100, 200, 300, 400, 500 e 600°C) ao longo da etapa de sensibilidade a temperatura dentro do procedimento 2, executados na velocidade de 60 km/h e 100 km/h. Na velocidade de 60 km/h o valor do *stroke* (a 1 bar) tem pouca variação com o acréscimo de temperatura em ambas formulações A e C. Por outro lado, na velocidade de 100 km/h, observa-se um aumento considerável no valor do *stroke* (a 1 bar) em cada faixa de temperatura ao longo do procedimento, sendo o *stroke* mais acentuado após os 300°C na formulação A e após 400 °C na formulação C. Esse acréscimo **não** é justificado pela flexibilidade do material, haja vista que em 1 bar pouca variação em termos de deformação do material de atrito é esperada.

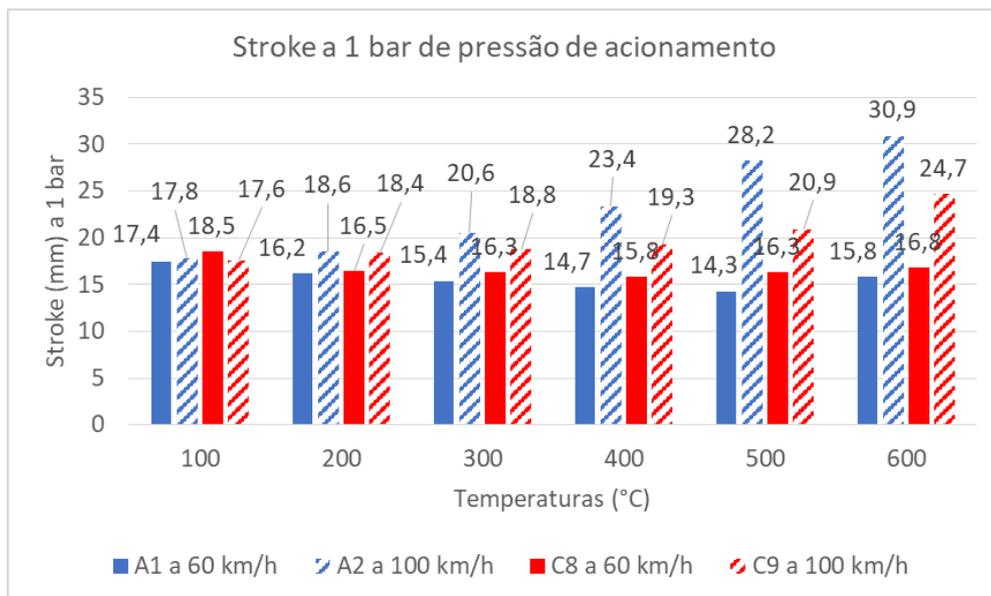


Figura 4.16 – *Stroke* @ 1bar a 60 km/h (Amostra A1 e C8) e 100 km/h (Amostra A2 e C9)

Tomando como referência a condição a 100 km/h, visto na Figura 4.15, onde a variação de *stroke* a 1 bar é em geral mais pronunciada do que a 60 km/h, avaliou-se o valor do *stroke* medido até o início do torque de frenagem, conforme mostrado na Figura 4.17. Claramente pode-se ver que parte considerável do aumento do valor de *stroke* é em função do aumento da folga entre disco e pastilha, que pode ser chamado de *free stroke* dinâmico. Dados históricos (obtidos em testes de desgaste em dinamômetro), mostram que o material da formulação A apresenta maiores níveis de desgaste a 100 km/h em todas as faixas de temperaturas, quando comparado ao material da formulação C. A 60 km/h esse comportamento já não é tão diferente para ambas formulações, e, além disso, o nível de desgaste é muito menor a 60 km/h do que a 100 km/h para ambas formulações. Dessa forma, isso sustenta a ideia de que o incremento de *free stroke* dinâmico ocorre em função do desgaste do material de atrito durante as 10 frenagens dentro de cada faixa de temperatura (de 1 a 10 bar) durante a etapa de sensibilidade a temperatura dentro do procedimento 2.

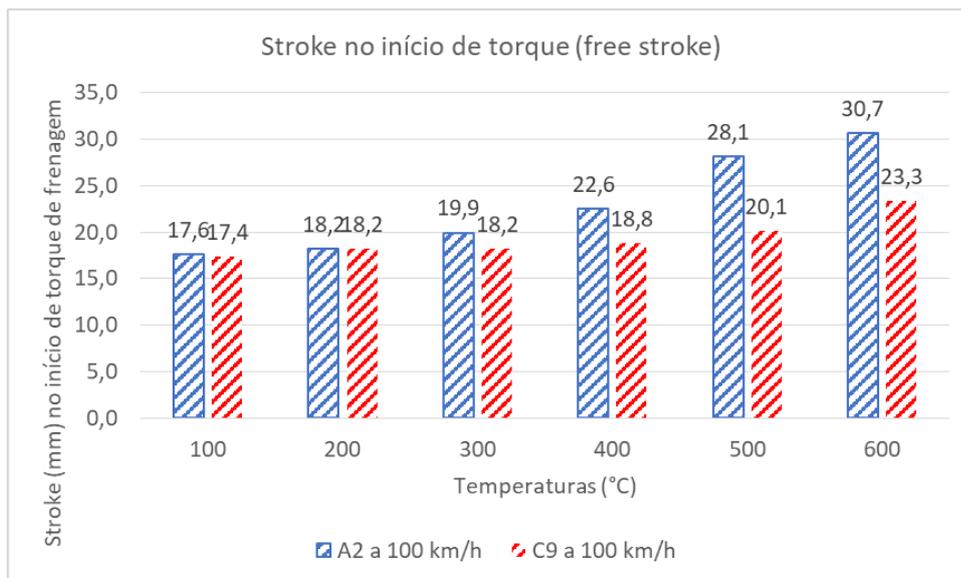


Figura 4.17 – *Free stroke* dinâmico de 100 a 600°C a 100 km/h para as amostras A2 e C9

Ainda pela Figura 4.17, pode-se calcular o valor de incremento de *stroke* de 100 °C para 400 °C em função do aumento do *free stroke* dinâmico. Assim, para a formulação A, o incremento é de $22,6 - 17,6 = 5,0$ mm. Já na formulação C, o incremento é de apenas $18,8 - 17,4 = 1,4$ mm. Dessa forma, descontando o incremento de *stroke* nas curvas a 100 km/h da Figura 4.15, chega-se aos valores de *stroke* mais próximos de uma condição onde o freio estivesse bem regulado, como pode-se ver na Figura 4.18. Mesmo com ajuste, a redução é pequena e é possível verificar que o aumento da temperatura de 100 para 400°C, na mesma velocidade de 100 km/h, os níveis de *stroke* a 2 e 8 bar se mantêm acima dos valores obtidos a 100°C.

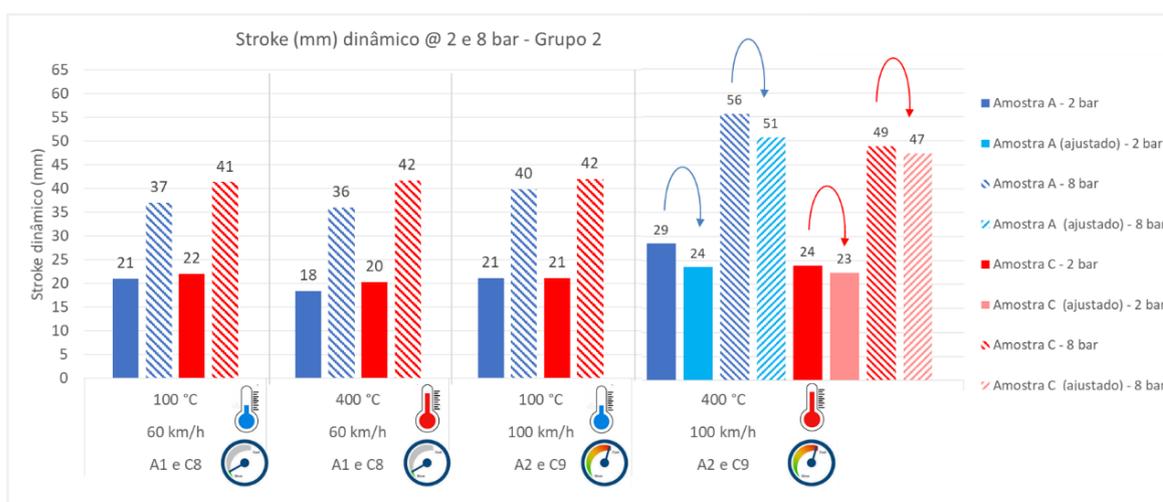


Figura 4.18 – *Stroke* dinâmico ajustado @ 2 e 8 bar @ 60 km/h (Amostra A2 e C9)

De uma forma geral, independente do material de atrito, a velocidade de 60 km/h tem menor influência sobre o *stroke*, independente da temperatura. Já ao aumentar a velocidade para 100 km/h, o efeito sobre o *stroke* ainda é pouco alterado quando a 100 °C. Porém, ao aumentar a temperatura para 400 °C, o *stroke* aumenta consideravelmente. Esse efeito tem forte influência do tipo de formulação, haja vista que a formulação que apresenta maior desgaste a 100 km/h (A2), apresenta maior nível de incremento de *free stroke* dinâmico ao longo do teste, e consecutivamente, ao executar a etapa de 400 °C acaba por estar em um patamar mais elevado de *stroke* do que o material C9 com menor desgaste.

A Figura 4.19, apresenta as variações de *stroke* de 1 a 10 bar entre 400 °C e 100 °C para as velocidades 60 km/h (Amostra A1 e C8) e 100 km/h (Amostra A2 e C9). Para cada pressão, faz-se o cálculo da diferença de *stroke* dinâmico entre o valor obtido a 400 °C e o valor obtido a 100 °C (Exemplo: pela Figura 4.18, para o material A2 a 100 km/h a 8 bar e 400°C tem-se 56 mm de *stroke*, já a 100°C tem-se 40 mm, ou seja, a diferença é de $56 - 40 = 16$ mm). Assim, pode-se ver na Figura 4.19, que as curvas de variação de *stroke* entre A1 e C8 são similares a 60 km/h. Além, disso, a variação de *stroke* é maior a 100 km/h do que a 60 km/h em ambos materiais, onde a 100 km/h, A2 tem valores bem mais altos de variações de *stroke* do que C9. Além disso, o *stroke* aumenta conforme eleva o valor de pressão de acionamento (indicado pela seta verde), mostrando que o material de atrito apresenta maior flexibilidade com o acréscimo de temperatura e pressão. Outro efeito que pode estar combinado e culminando no acréscimo de *stroke* é a própria irregularidade da superfície do material A e C, que, como vimos no item 4.4.2, tende a aumentar o nível de *stroke* (devido ao efeito de torção do cáliper), principalmente para materiais de menor compressibilidade.

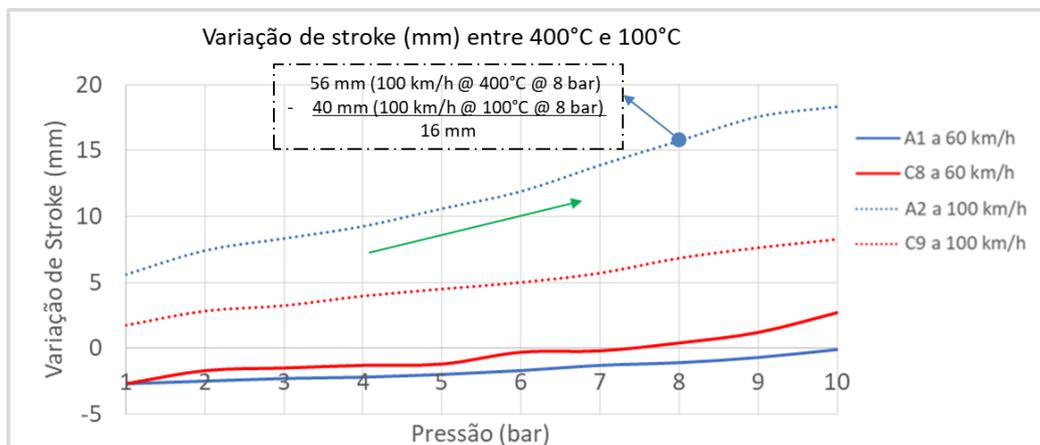


Figura 4.19 – Diferença de *stroke* entre 400°C e 100°C vs pressão - 60 km/h (Amostra A1 e C8) e 100 km/h (Amostra A2 e C9)

De forma consolidada, juntando os resultados obtidos durante a análise dos resultados do procedimento 1 (item 4.4) com os resultados obtidos com o procedimento 2 (item 4.5) a justificativa do maior nível de *stroke* dinâmico do material A2 a 100 km/h, fica por conta da condição final da pastilha, a qual apresenta alto desgaste parcial, alto desgaste irregular (predominantemente do tipo tangencial cruzado) e, principalmente em função da baixa compressibilidade a frio da formulação A. Todas essas características somadas acabam comprometendo o funcionamento do mecanismo de ajuste do freio, o qual acaba não regulando suficientemente para reduzir o *free stroke* dinâmico ao longo da etapa de sensibilidade a temperatura dentro do procedimento 2, e por consequência disso, o valor de pico *stroke* com o material A2 a 400 °C acaba sendo mais pronunciado do que o C9.

4.6 Curva do *stroke* - A2 vs D (objetivo 3 – Análise complementar)

Na Figura 4.20, pode-se verificar os resultados da avaliação complementar do objetivo 3, onde pode-se ver as curvas de *stroke* do PAFF do Grupo 2 (PAFF G2 da amostra A2 inicial e final a 100 km/h) com os resultados do PAFF do Grupo 1 (PAFF G1 da amostra D - bloco de aço). A comparação com o bloco de aço usinado é interessante pois trata-se da condição mais próxima de um material de superfície “ideal”, já que a planicidade da superfície é baixíssima quando comparado ao de uma pastilha. Estrategicamente foram selecionados 3 pontos de para realizar as análises detalhadas, sendo o ponto 1, 2 e 3, o acionamento número 50 (2 bar), 51 (0,6 bar) e 52 (8 bar), respectivamente.

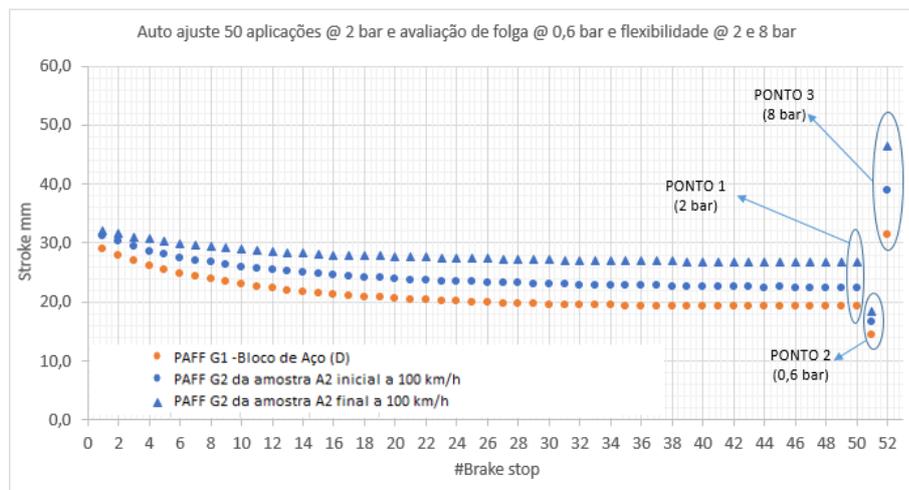


Figura 4.20 – PAFF G2 amostra A2 (inicial e final) versus PAFF G1 amostra D

Em uma avaliação macro das curvas instantâneas de *stroke* (*stroke* versus tempo), antes de aprofundar a análise, pode ser visto na Figura 4.21, onde o ponto 1 pode ser visto em (a), o ponto 2 em (b) e o ponto 3 em (c). O objetivo de apresentar essas curvas é mostrar que cada uma das aplicações possui 4 segundos de atuação da pressão, desde o acionamento até a liberação e, além disso, pode-se perceber nessas curvas que o *stroke* varia para cada pressão de aplicação, tanto em nível máximo quanto em perfil de ascendência do *stroke* e pressão.

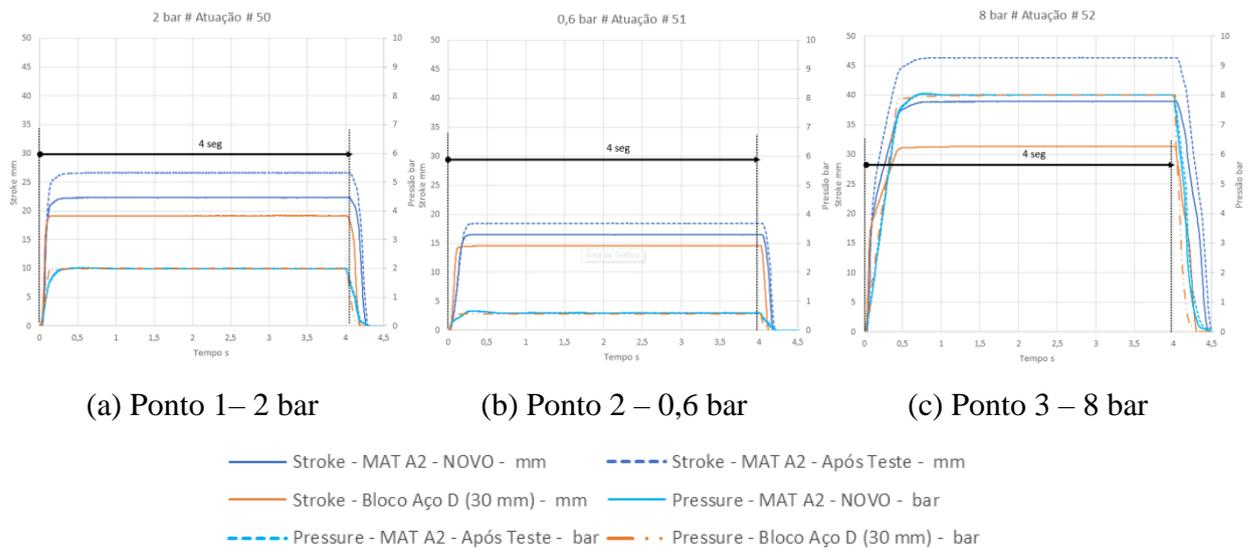


Figura 4.21 – Dados instantâneos do acionamento do (a) Ponto 1, (b) Ponto 2 e (c) Ponto 3.

Agora, através de uma análise mais detalhada das curvas de *stroke* (mm) e das curvas de pressão de acionamento (bar) durante os primeiros 0,36 s, mostrados na Figura 4.21, é possível extrair algumas informações importantes para melhor compreensão dos efeitos de superfície (Ponto 2 – 0,6 bar) e flexibilidade (Pontos 1 e 3 – respectivamente 2 e 8 bar) sobre o *stroke*. Primeiramente serão detalhadas todas as métricas de cada um dos pontos avaliados, e ao final serão feitos os comentários e conclusões dessa análise complementar do objetivo 3.

Ponto 2 (Acionamento a 0,6 bar): A partir da Figura 4.22 pode-se extrair as seguintes métricas, mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Métricas extraídas através do ponto 2.

Métrica	Descrição da métrica
X	Tempo de enchimento da câmara
Y	Tempo de acomodação dos blocos de aço de 30 mm (Material D)
W	Tempo de acomodação das pastilhas Novas (Material A2)
Z	Tempo de acomodação das pastilhas Usadas (Material A2)
FSY	<i>free stroke</i> até a pastilha tocar no disco e o mecanismo de ajuste desarmar (Material D)
FSW	<i>free stroke</i> até as pastilhas NOVAS tocarem no disco e o mecanismo de ajuste desarmar @ 0,6 bar (Material A2)
FSZ	<i>free stroke</i> até as pastilhas USADAS tocarem no disco e o mecanismo de ajuste desarmar @ 0,6 bar (Material A2)
FSW - FSY	<i>stroke</i> adicional ao dos blocos de aço para acomodação das pastilhas NOVAS @ 0,6 bar (Material A2)
FSW - FSY	<i>stroke</i> adicional ao dos blocos de aço para acomodação das pastilhas USADAS @ 0,6 bar (Material A2)

Observação: Tempo para acomodação das pastilhas e “desarme” do mecanismo de ajuste não segue o padrão de 0,04 segundos visto na Figura 2.7, isso porque para encher a câmara a 0,6 bar o processo é mais lento que o usual em pressões acima de 1 bar. Isso acaba sendo interessante para ser possível avaliar cuidadosamente o processo de acomodação das pastilhas. É possível observar que existe uma reação sobre a curva de pressão durante o processo de acomodação das pastilhas, o que acaba gerando um pequeno “atraso” no enchimento da câmara até a chegada ao nível pleno de pressão daquele acionamento em questão, neste caso a 0,6 bar.

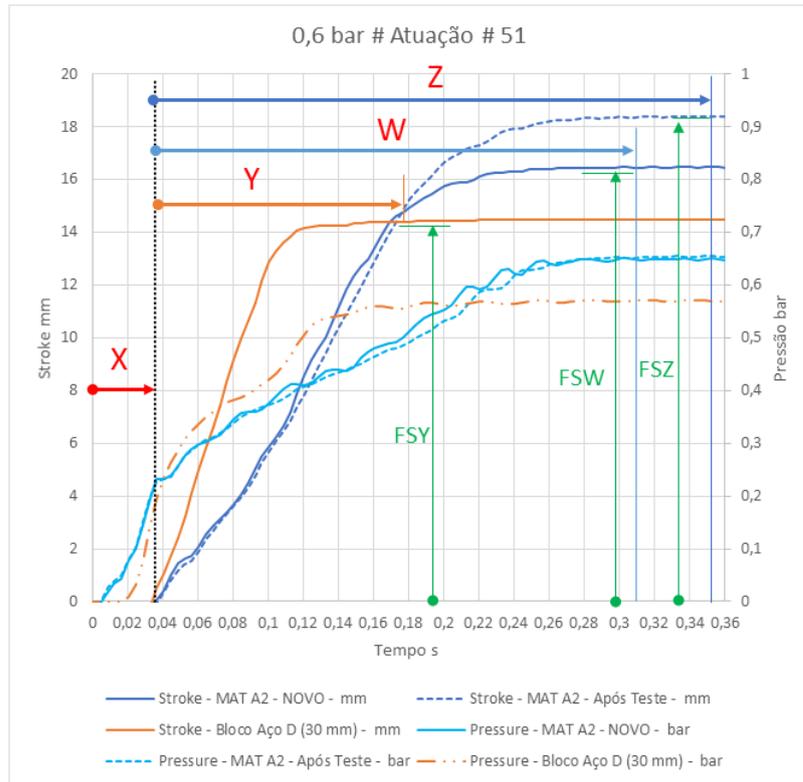


Figura 4.22 – Detalhamento das métricas durante o acionamento do ponto 2 – 0,6 bar

Ponto 1 (Acionamento a 2 bar): A partir da Figura 4.23 pode-se extrair as seguintes métricas, mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Métricas extraídas através do ponto 1.

Métrica	Descrição da métrica
$Y = W = Z = 0,04 \text{ seg.}$	tempo para as pastilhas tocarem o disco e desarmar o mecanismo (dinâmico e estático acima de 1 bar).
X	tempo de enchimento da câmara
SY@2bar	FSY + Deformação do sistema e pastilhas (Material D)
SW@2bar	FSW + Deformação do sistema e pastilhas NOVAS (Material A2)
SZ@2bar	FSZ + Deformação do sistema e pastilhas USADAS (Material A2)

Observação: Em 2 bar já fica difícil de identificar a diferença de tempo de acomodação entre W e Z.

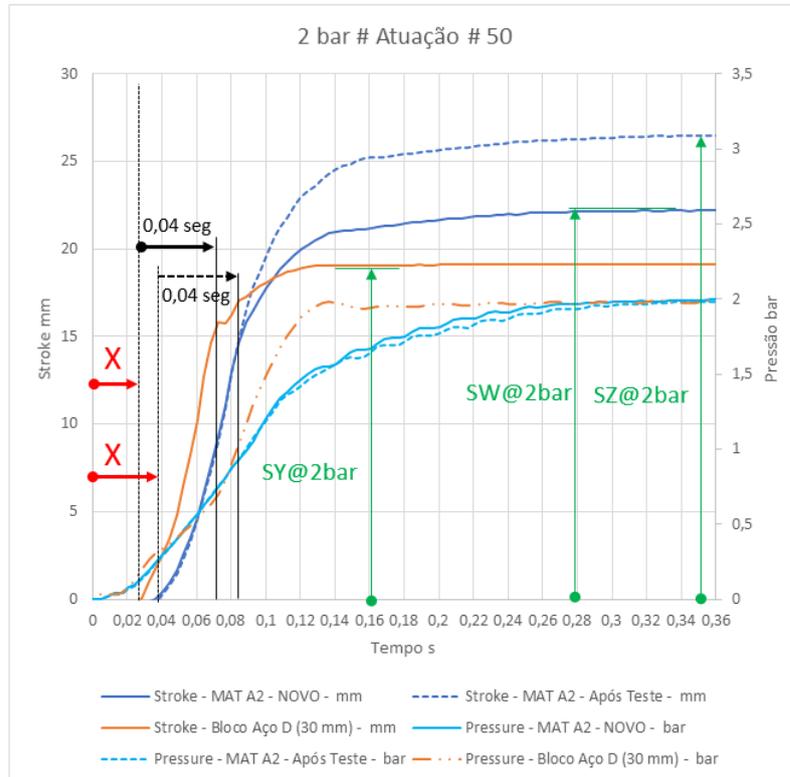


Figura 4.23 – Detalhamento das métricas durante o acionamento do ponto 1 – 2 bar

Ponto 3 (Acionamento a 8 bar):

Devido ao elevado nível de pressão, o tempo de estabilização de *stroke* é mais elevado, desta forma, dividiu-se o detalhamento do acionamento em 02 figuras. A partir da Figura 4.24 (tempo de 0,36 segundos) e da Figura 4.25 (tempo de 1 segundo) pode-se extrair as seguintes métricas, mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3

Tabela 4.3 – Métricas extraídas através do ponto 3.

Métrica	Descrição da métrica
X = Y = W = 0,04 seg.	tempo para as pastilhas tocarem o disco e desarmar o mecanismo (dinâmico e estático acima de 1 bar).
X	tempo de enchimento da câmara
SY@8bar	FSY + Deformação do sistema e pastilhas (Material D)
SW@8bar	FSW + Deformação do sistema e pastilhas NOVAS (Material A2)
SZ@8bar	FSZ + Deformação do sistema e pastilhas USADAS (Material A2)

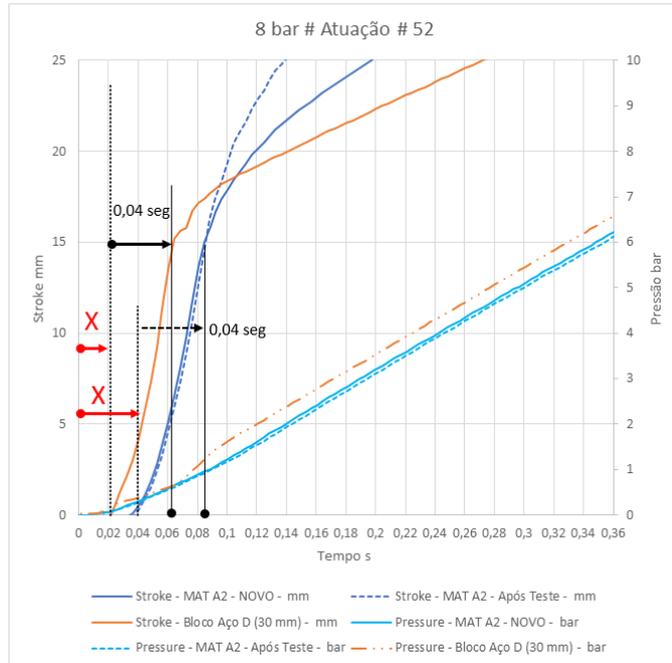


Figura 4.24 – Detalhamento das métricas durante o acionamento do ponto 3 – 8 bar

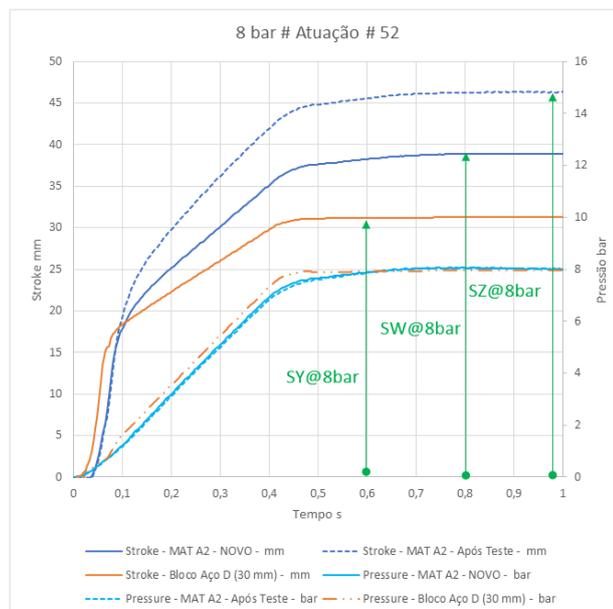


Figura 4.25 – Detalhamento das Métricas durante o acionamento do Ponto 3 – 8 bar

O efeito de superfície entre uma peça usada e nova é bastante sutil e até mesmo difícil de observar o instante em que ocorre a acomodação das pastilhas, porém, como pode-se ver na Figura 4.22, é possível observar essa pequena diferença quando em um acionamento lento (a 0,6 bar) onde fica mais claro a diferença no nível de *stroke* ao final do auto-ajuste (50ª aplicação do PAFF). Fica ainda mais claro o efeito da superfície quando comparado o *free*

stroke em qualquer uma das condições de pastilhas, seja o material A2 usada (FSZ) e até mesmo uma pastilha nova do material A2 (FSW), com o valor de *free stroke* do bloco de aço D (FSY). O tempo para a acomodação é menor quanto mais regular/homogênea a condição de desgaste na superfície da pastilha, ou seja, $Y < W < Z$, e esse comportamento ajuda muito o mecanismo do freio a manter a regulação do freio em níveis de *free stroke* bem baixos.

Dessa forma, fica nítido com tudo que foi apresentado acima, que o efeito da regularidade e homogeneidade da superfície influencia diretamente o nível de *stroke* obtido durante o ensaio e também no próprio mecanismo de ajuste do freio, algumas vezes mais e outras vezes menos acentuado, dependendo do material, compressibilidade a frio, do nível de desgaste irregular e parcial obtido.

5 CONCLUSÕES

A seguir, são descritos cada um dos objetivos e respectivas respostas obtidas no decorrer do presente trabalho. Inicialmente serão apresentadas as conclusões dos objetivos específicos 5 e 6 relativos às análises complementares (sem giro do disco) do comportamento do *stroke* com a contribuição do material de atrito ou apenas do sistema. Essas respostas são essenciais para auxiliar na compreensão das conclusões e comentários referentes aos efeitos dinâmicos (com giro do disco) sobre o *stroke*, conforme os objetivos específicos 4, 3, 1 e 2

- **Objetivo específico 5:** Efeito de 03 tipos de desgaste irregular (simuladas com blocos de aço e um dos tipos de desgastes com pastilha de material compósito) sobre o curso livre do freio (*free stroke* – folga entre blocos de aço e disco) e flexibilidade do sistema;

Tomando como referência o bloco de aço (D) com superfície homogênea, conclui-se que os desgastes irregulares aumentam os níveis de *free stroke* (acionamento de 0,6 bar após auto-ajuste) e apresentam níveis de *stroke* mais elevados em função da grande deformação no sistema mecânico e estrutura do calíper durante a avaliação da flexibilidade a 2 e 8 bar (ficando bem mais pronunciado a 8 bar). Em suma, o *free stroke* é mais pronunciado com o desgaste do tipo tangencial cruzado (D1), com um aumento de 64% com relação ao bloco de aço D, e a flexibilidade do sistema é mais acentuada com o desgaste tangencial afunilado (D2), em torno de 64% e 91% a 2 e 8 bar, respectivamente. Apesar de estar mais acentuado

nesses tipos de desgaste, todos os desgastes irregulares mostram um nível mais elevado de *stroke* do que em uma condição homogênea de superfície de contato do bloco de aço D.

Ao comparar o bloco de aço D com seu respectivo tipo de superfície homogênea em material compósito (C10), o aumento do *free stroke* e *stroke* foi de 19%, 32% e 63% a 0,6, 2 e 8 bar, respectivamente, de D em relação a C10.

Ao comparar o bloco de aço D1 com uma pastilha de material compósito simulando a mesma condição de desgaste tangencial cruzado (C11), um acréscimo de 9 e 10 %, para 2 e 8 bar, respectivamente, de D1 para C11. O *free stroke* reduz 10 % de D1 para C11. Durante o acionamento do freio um dos pistões toca muito antes o bloco de aço D1, e como o bloco de aço é extremamente rígido, o mecanismo de ajuste desarma um pouco antes e o *free stroke* é maior em D1 (22,7 mm) do que C11 (20,6 mm). Dessa forma, pode-se dizer que materiais de atrito com menor compressibilidade (como por exemplo o da formulação A) tenderiam a apresentar maiores *free stroke* do que os de maior compressibilidade (como por exemplo o da formulação C) em caso de níveis similares de desgastes irregulares.

Além disso, com o material compósito o nível de *stroke* em uma condição de superfície irregular (C11) não segue a mesma proporção de acréscimo % de *stroke* do que é obtido com o bloco de aço de superfície irregular (D1). A hipótese é que ao ser comprimido contra o disco, o material compósito com superfície irregular (tangencial cruzado) deforma o suficiente para compensar parte da deformação do sistema de freio, assim a torção no sistema de freio é menor do que com o bloco de aço.

- **Objetivo específico 6:** Efeito de início e fim de vida da pastilha (simuladas com blocos de aço) sobre o curso livre do freio (*free stroke* – folga entre blocos de aço e disco) e flexibilidade do sistema.

A redução da espessura da pastilha tende a não afetar no resultado do nível de *free stroke* ao final das 50 aplicações de auto-ajuste. Por outro lado, a flexibilidade do sistema é maior a medida que o fim de vida se aproxima, sendo bem evidente na pressão de 8 bar.

- **Objetivos específico 4:** Relação de contribuição (%) do efeito do desgaste irregular da superfície e do efeito da variação da flexibilidade da estrutura do material de atrito abaixo da superfície (*bulk*);

Ao analisar o nível de *stroke* a 2 bar e 8 bar, pode-se verificar que a relação de contribuição do efeito de *bulk* e do efeito de superfície sobre o *stroke* para o material C3 é de 50 % para cada uma das parcelas analisadas. Apesar disso, deve-se sempre ter em mente que a redução da espessura da pastilha acaba por minimizar a contribuição do *bulk*, ou seja, a parcela do *bulk* poderia ser ainda maior do que a da superfície, se fosse possível desmembrar tais efeitos.

➤ **Objetivo específico 3:** Efeito do desgaste irregular da superfície do material de atrito sobre o curso livre do freio (*free stroke* – folga entre pastilha e disco) e variação da flexibilidade da estrutura do material de atrito abaixo da superfície (*bulk*);

Avaliando o PAFF G2 inicial e final, pode-se concluir que o material A tende a ter pouca variação na flexibilidade de *bulk* e superfície a 60km/h, com menos de 5% de aumento no nível de *stroke* a 8 bar. Já a 100 km/h, o aumento no nível de *stroke* é de 18% a 8 bar. Para o material C, em ambas velocidades o efeito sobre o *stroke* é mais pronunciado. A 60 km/h o aumento foi de 20 % a 8 bar e a 100 km/h foi de 13 % a 8 bar. Além disso, com o material C o nível de *stroke* mostrou-se sempre mais elevado ao final do teste, com nível 17 % e 9 % superior ao material A a 8 bar após etapa de 60 km/h e 100 km/h, respectivamente.

Avaliando as inspeções iniciais e finais, pode-se concluir que o nível de desgaste parcial a 60 km/h não é tão expressivo, ficando abaixo de 0,6 mm para ambas formulações A e C. Da mesma forma os desgastes irregulares para ambos materiais ficam abaixo de 0,9 mm, e assim isso pouco influencia no valor de *free stroke*. Já para a velocidade de 100 km/h, o desgaste parcial já é mais expressivo para o material A, com 3,9 mm, contra 1,9 mm do material C. O desgaste irregular é similar, sendo de 1,4 mm para o material C e de 1,2 mm para o material A. O tipo do perfil de desgaste também é muito similar e é do tipo tangencial cruzado para A e C. Desprezando o desgaste parcial, visto que durante o PAFF o freio passar por um auto-ajuste, entende-se que o aumento no valor do *free stroke* em 1,9 mm, durante a execução do PAFF G2 com o material A, tem forte relação com a menor compressibilidade da formulação A, já que as demais variáveis (desgaste irregular, perfil de desgaste) são similares.

- **Objetivo específico 1 e 2:** Efeito de diferentes velocidades (60 km/h e 100 km/h) e efeito do aumento da temperatura durante o ensaio (100 e 400 °C);

De uma forma geral, independente do material de atrito, a velocidade de 60 km/h tem menor influência sobre o *stroke* dinâmico, independente da temperatura. Já ao aumentar a velocidade para 100 km/h, o efeito sobre o *stroke* dinâmico ainda é pouco alterado quando a 100°C. Porém, ao aumentar a temperatura para 400°C, o *stroke* dinâmico aumenta consideravelmente, para ambos materiais analisados. Pode-se ver que o nível máximo de *stroke* dinâmico tem forte influência do tipo de formulação.

Apesar do material A apresentar menor compressibilidade, ele apresenta maior desgaste a 100 km/h (A2), e assim, apresenta maior nível de incremento de *free stroke* dinâmico (*stroke* até iniciar o torque de frenagem) ao longo da etapa de sensibilidade a temperatura dentro do procedimento 2, e consecutivamente, ao executar a etapa de 400°C acaba por estar em um patamar mais elevado de *stroke* do que o material C9 com menor desgaste.

Dessa forma, os “saltos” de níveis de *free stroke* dinâmico a cada faixa de temperatura tem forte relação com a combinação de desgaste parcial, irregular, baixa compressibilidade e o seu efeito sobre o mecanismo de ajuste. Por consequência disso, as curvas de variação de *stroke* entre A e C são similares a 60 km/h. Já para a 100 km/h, a formulação A tem valores mais elevados de *stroke* do que C. Mesmo o material C apresenta um acréscimo na curva, porém, não tão elevado quanto o A. Isso também pode ser explicado pelo nível não tão elevado de *free stroke* dinâmico ao longo do ensaio, bem como o menor desgaste de C. Além disso, as formulações A e C tendem a apresentar maior flexibilidade com o acréscimo de temperatura e pressão, e isso, combinado com a irregularidade da superfície mais pronunciada ao fim do teste, culmina em uma variação de *stroke*, de 100°C para 400°C, ainda mais elevada para o material A (de baixa compressibilidade) a 100 km/h.

- **Objetivo 3 (Análise complementar):**

Com base nas curvas instantâneas de *stroke* versus o tempo, conclui-se que a regularidade e homogeneidade da superfície influencia diretamente o nível de *stroke* obtido durante o ensaio e também no próprio comportamento do mecanismo de ajuste do freio, algumas vezes mais e outras vezes menos acentuado, dependendo do material, do valor da compressibilidade

a frio, do nível de desgaste irregular e parcial obtido. Além disso, é muito sutil, porém é possível verificar que até mesmo o tempo de acomodação total da pastilha é maior conforme o nível de irregularidade da pastilha é mais elevado.

➤ **Conclusões gerais:**

A combinação de material de baixa compressibilidade a frio com altos níveis de desgaste irregular (principalmente do tipo tangencial cruzado), faz com que o mecanismo de ajuste do freio desarme com uma pequena antecedência, deixando de regular alguns décimos de milímetros a cada acionamento, e assim o *free stroke* é maior. Ao considerar o desgaste durante a frenagem maior do que a capacidade do mecanismo regular, é inevitável observar um aumento de folga entre pastilha e disco (aumento de *free stroke* dinâmico) e por consequência disso verifica-se um aumento do pico de *stroke*, principalmente ao acumular um grande número de frenagens em altas temperaturas. Basicamente, uma formulação que apresente principalmente um baixo valor de compressibilidade a frio, combinado a níveis de desgastes parciais elevados, desgaste irregular do tipo tangencial cruzado elevado, como é o caso do material A, tendem, apesar da baixa flexibilidade do *bulk*, a apresentar maiores níveis de *stroke* dinâmico. Ao longo do ensaio e/ou aplicação em veículo, isso pode representar em um aumento considerável no nível de *stroke* máximo, e isso pode até mesmo ser percebido pelo motorista em função do aumento de curso do pedal de freio e até mesmo, em casos extremos, a perda de performance para uma mesma pressão de aplicação e, consecutivamente, aumento de distância de parada do veículo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, D.S., MENETRIER, A. R., BREZOLIN, A., FAVERO, J., PAVLAK, R. **P. Influence of friction material and brake system strain on pedal feeling for racing vehicles.** SAE Technical Paper 2019-36-0002, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-36-0002>.

ANTUNES, D. **Metodologia de avaliação de instabilidade dinâmica em freios a tambor utilizando o método dos elementos finitos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10753:** Guarnição do freio – avaliação das características do material de fricção em bancada de ensaio tipo inercial (dinamômetro), para freios de automóveis e camionetas de uso misto. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13776:** Veículos rodoviários automotores, seus rebocados e combinados – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

AZEVEDO, A. G. L. **Avaliação da técnica da dupla camada na recuperação de peças de aço abnt 1045.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2002.

BASCH, R. H., SANDERS, P., HARTSOCK, D., EVANS, C. **Correlation of Lining Properties with Brake Pedal Feel,** SAE Technical Paper 2018-01-1889, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1889>.

BENDIX, **Overview Brochure Bendix Air Disc Brakes.** Bendix Spicer Foundation Brake LLC. Disponível em: <www.foundationbrakes.com>. Acesso em: 26 de mar. de 2022.

BREZOLIN, A. **Estudo de geração de trincas térmicas em disco de freios de veículos comerciais.** 2007. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

BRAKE CALIPERS. **Goodyear Auto Service.** Disponível em: <<https://www.goodyearautoservice.com/en-US/brakes/calipers>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

BRAKES. Sharp Brake & Clutch, 2019. Disponível em: <<https://www.sharpbrake.co.za/category/brakes/>>. Acesso em 31 de jul. de 2021.

CALLISTER, W. D. RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering: an introduction. 8. ed. Hoboken, Estados Unidos: Wiley, 2010. 967 p. ISBN 9780470419977.

CASARIL, A. Tenacidade à fratura de materiais compósitos de fricção como requisito de projeto de componentes de frenagem para a indústria automobilística. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DAY, A. J. Braking and Road Vehicle. 6. ed. Butterworth-Heinemann, 2014. 488 p. ISBN 978-0123973146.

DISC BRAKE. MATHWORKS, 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sdl/ref/discbrake.html?searchHighlight=disc%20brake&s_tid=srchtitle_disc%20brake_1>. Acesso em 27 de ago. de 2022.

FRAS-LE SA. Medição de temperaturas com infravermelho vs Análise em FEA – 1128-22 – Relatório técnico. Caxias do Sul, 2021.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fundamentos de Física – Volume 1, Editora LTC, 330 p., Rio de Janeiro, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6310: Road vehicles – Brake linings – Compressive strain test methods. Switzerland: ISO, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. Portaria nº55. 2014.

IOMBRILLER, S. F. Análise térmica e dinâmica do sistema de freio a disco de veículos comerciais. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

KNORR-BREMSE. Service Manual, Pneumatic disc brake SB5, SB6, SB7, SB7 radial, Truck Services, reference No C16352EN-006, Doc.No.C16352 (EN – Rev. 007), August 2019.

KRAFTFAHRT-BUNDESAMT, Concerning a confirmation of a Test Report regarding Annex 11 Appendix 2 item 3.9. of ECE Regulation No. 13 for a reference axle/brake: DBT19LT, Confirmation number: 110237, Number of test report: 36108715-00, 36108715-01, DE-24932 Flensburg, 2015.

LAMB, R. G. **Estudo do comportamento de desgaste de material de atrito em função de variáveis de aplicação**. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

LEE, K. **Numerical prediction of brake fluid temperature rise during braking and heat soaking**. SAE Technical Papers, n. 724, 1999. DOI: <https://doi.org/10.4271/1999-01-0483>.

LIMPERT, R. **Brake design and safety**. 2 ed. Warrendale, United States of America: SAE International, 1999.

LIMPERT, R. **Brake design and safety**. 3 ed. Warrendale, United States of America: SAE International, 2011.

MAGIONI, L., CASAGRANDE, D. E., 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 2015-36-0002, Brake Colloquium, 2015.

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

MATOZO, L. T. **Estudo da relação entre propriedades de compósitos de fricção aplicados a sistemas de freio a disco e a propensão à ocorrência de squeal noise**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MENETRIER, A. R. **Estudo de variáveis de composição e processo para controle da compressibilidade**. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

MERITOR DISC BRAKE TRAINING. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Ct1qy3HPiXM>>. Acesso em: 11 de mai. de 2022.

MERITOR. **Meritor Inc Air Disc Brake**, Service Manual Elsa 195, 225, 250. Maintenance Manual MM0350, 2016.

MERITOR, **The Meritor guide to ELSA 225/195 Brake Servicing**. Issued 02-15 Publication MPN1140EN, 2015.

MGM Brakes. **Type 30/36 Long Stroke Brake Actuators**. Charlotte, 19/04/2018. Disponível em: < https://mgmbrakes.com/files/9415/2450/6143/3036_LS_final_1.pdf>. Acesso em: 09 de ago. de 2022.

MICKE, S., THOMPSON, R. E., ROEHLING, B. H. **The Introduction of ADB for trucks and buses in Europe**, SAE Technical Paper Series, Truck and Bus Meeting and Exposition, Detroit, Michigan, 1990.

NEIS, P. D. **Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

NICHOLSON G. **Facts about friction**. Winchester, United States of America: Gedoran, 1995.

NONG, X. D., JIANG, Y. L., FANG, M., YU, L., LIU, C. Y. **Numerical analysis of novel SiC3D/Al alloy co-continuous composites ventilated brake disc**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 108, p. 1374–1382, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.108>.

PAVLAK, R. P. **Análise de materiais de fricção com diferentes compressibilidades e sua propensão a geração de trincas térmicas em discos de freio automotivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

PRADO, W. B., IOMBRILLER, S. F., SILVA, M. A. R., OLIVEIRA, L. R. **Commercial vehicle pedal feeling comfort ranges definition**. SAE Technical Paper 2019-36-0016, 2019, DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-36-0016>.

REILLY, R. **The Air Brake Book**. 10. ed. Tuscaloosa: Commercial Carrier Journal, 2019.

RUNNING CLEARANCE IN DETAIL. **JURID**. Disponível em: <https://www.jurid.com/technical-support/commercial-vehicles/technical-tips/running-clearance.html#regular>. Acesso em 27 de ago. de 2022.

SANTOS, R. L., OLIVEIRA, A. C., TRAVAGLIA, C., ROMAN, A. **Comparative of drum brake performance fitted with cast and stamped shoes on urban bus**. SAE Technical Paper 2011-05-0054, Brake Colloquium, 2011.

SANTOS, R. L., MASOTTI, D., SILVA, P. H. M., SEVERO, D. A., FERREIRA, N. F., POLETTO, J. C., BARROS, L. Y., NEIS, P. D. **Effect of alternation of braking conditions on friction material**. SAE Technical Paper 2019-36-0010, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-36-0010>.

SANTOS, R. L., EVERTON P. A, DIEGO S. A., JULIANA F, MATEUS A. G., MAURICIO L., LUCIANO M., NEIS, P. D, FERREIRA, N. F. **Influence of friction material and brake system strain on the brake air chamber total stroke.** SAE Technical Paper 2021-36-433, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-36-0433> .

SHACKELFORD, J. F. **Materials science for engineers.** 6. ed. New Jersey: Pearson, 2008. 556 p. ISBN 9788576051602.

SILVA, D. T., FERREIRA, N. F., NEIS, P. D., SOARES, M. R. **Determinação do fluxo de calor entre pastilha e disco de freio durante frenagens.** V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, 2008.

SUBRAMANIAN, S. C. **Modeling the pneumatic subsystem of a S-Cam Air Brake System.** 2003. Thesis (Master of Science) – Texas A&M University, Texas, 2003.

STACHOWIAK, G. W. **Wear: Materials, Mechanisms and Practice - Tribology in Practice Series (TIPS),** John Wiley & Sons Ltd, 2005.

TIROVIC M, SERGENT N, CAMPBELL J, ROBERTS P, VIGNJEVIC R. Structural analysis of a commercial vehicle disc brake caliper. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering,** Bedfordshire, v. 226, n. 5, p. 613-622, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407011423447>.

APÊNDICE A Procedimento de testes em dinamômetro adaptado e reduzido do original TR
Pads de 26 de outubro de 2018.

PERFORMANCE TEST DISC BRAKES								
Test no.	Test sequence	Pressure (bar)	Deceleration (m/s ²)	Pause (s)	Initial speed (km/h)	Final speed (km/h)	IBT	No. of stops
Inspeção e medições de pastilhas e disco + Fotos								
Procedimento de Avaliação das Folgas								
THERMAL BEDDING IN								
12	Heating	3			60	0	250	-
	Stabilizing	3			60	0	250	5
	Recovery	3			60	0	200	1
		3			60	0	150	1
		3			60	0	100	1
13	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
14	Heating	3			60	0	300	-
	Stabilizing	3			60	0	300	5
	Recovery	3			60	0	250	1
		3			60	0	200	1
		3			60	0	150	1
3				60	0	100	1	
15	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
16	Heating	3			60	0	400	-
	Stabilizing	3			60	0	400	5
	Recovery	3			60	0	350	1
		3			60	0	300	1
		3			60	0	250	1
		3			60	0	200	1
		3			60	0	150	1
3			60	0	100	1		
17	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
18	Recovery		1, 2, 3		60	0	150	30
19	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
Esfriar o Freio < 50°C								
Inspeção e medições de pastilhas e disco + Fotos								
Procedimento de Avaliação das Folgas								
FADE								
33	60-0 Fade		3	60	60	0	Stop 1 <100	43
34	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
35	Recovery		1, 2, 3		60	0	150	30
37	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
38	Recovery		1, 2, 3		60	0	150	99
39	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
Esfriar o Freio < 50°C								
Inspeção e medições de pastilhas e disco + Fotos								
Procedimento de Avaliação das Folgas								
TEMPERATURE SENSITIVITY - 60 km/h								
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	100	10
41	Performance Test	1 to 10			60	0	100	10
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	200	10
45	Performance Test	1 to 10			60	0	200	10
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	300	10
49	Performance Test	1 to 10			60	0	300	10
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	400	10
53	Performance Test	1 to 10			60	0	400	10
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	500	10
57	Performance Test	1 to 10			60	0	500	10
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	600	10
61	Performance Test	1 to 10			60	0	600	10
64	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7

Esfriar o Freio < 50°C								
Inspeção e medições de pastilhas e disco + Fotos								
Procedimento de Avaliação das Folgas								
TEMPERATURE SENSITIVITY - 100 km/h								
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	100	10
43	Performance Test	1 to 10			100	0	100	4
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	200	10
47	Performance Test	1 to 10			100	0	200	4
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	300	10
51	Performance Test	1 to 10			100	0	300	4
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	400	10
55	Performance Test	1 to 10			100	0	400	4
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	500	10
59	Performance Test	1 to 10			100	0	500	4
-	Heating + Stabilizing	10			60	0	600	10
63	Performance Test	1 to 10			100	0	600	4
64	Efficiency test	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10			60	0	100	7
Esfriar o Freio < 50°C								
Inspeção e medições de pastilhas e disco + Fotos								
Procedimento de Avaliação das Folgas								

APÊNDICE B Método de testes demonstrado por Santos et al, 2021.

Santos et al, 2021, definiu 02 métodos de ensaios (que serão explorados a seguir). O autor comenta que é importante que as amostras de pastilhas tenham valores médios de compressibilidade a frio conhecidos e similares entre os 02 métodos de testes utilizados.

Dessa forma, é importante a prévia seleção das amostras de pastilhas com base no valor de compressibilidade a frio, que trata-se de um ensaio não destrutivo, onde as amostras podem ser utilizadas posteriormente para outros ensaios. Para isso, realiza-se o procedimento de testes padrão ISO 6310:2009 método B, o qual utiliza o equipamento da Link, modelo 1620.

Durante a execução desse ensaio, a superfície do equipamento que fica em contato com o material de atrito e o próprio material de atrito é mantida em temperatura ambiente, e um cilindro, com mesmo diâmetro do pistão que é utilizado no ADB, pressiona a pastilha de freio através de sua plaqueta (similamente ao que acontece no sistema de freio). A medição da deflexão do material de atrito é feita por um sensor de deslocamento linear, e a força é medida através de uma célula de carga. A força é proporcional a pressão de 5 MPa na superfície da pastilha. Durante a medição da compressibilidade a frio são realizados 3 ciclos de pressão para cada amostra, e o valor da compressibilidade a frio é calculada a partir da diferença entre o pico máximo da subida do 3º ciclo decontado do valor inicial desse mesmo 3º ciclo.

Uma observação importante deve ser feita: quando necessário, pode-se realizar ensaios de caracterização da compressibilidade a quente, onde a superfície do equipamento que fica em contato com a pastilha é aquecido, podendo chegar até 600°C, porém, segundo a norma ISO 6310:2009 método B a temperatura que deve ser utilizada é de 400°C. Após a estabilização da temperatura durante 15 minutos, faz-se a medição da compressibilidade a quente, que trata-se da realização de 2 ciclos de pressão para cada amostra, e o valor da compressibilidade a quente é calculada a partir da diferença entre o pico máximo da subida do 2º ciclo decontado do valor inicial desse mesmo 2º ciclo. Esse método foi utilizado pelo autor para avaliar os picos de deflexão do material de atrito durante avaliações do efeito da temperatura em uma das amostras.

Dessa forma, com base em uma população de amostras de pastilhas, o autor realizou a seleção de 20 amostras de pastilhas com 03 diferentes formulações: A (3 amostras), B (6 amostras) e C (11 amostras). Números após a letra foram usados para identificar as condições de estudo. Também foram utilizados blocos de aço com geometria de uma pastilha para

simular a condição de pastilhas novas (D) e pastilha em fim de vida (E). Após a seleção das amostras, tais influenciadores foram avaliados através de dois métodos:

Método 1 (M1):

Equipamento de teste: Realizado em um equipamento (bancada) padrão de medição da propriedade de compressibilidade do material de atrito, com dispositivo específico para pastilhas para ADB.

Procedimento de teste: através do procedimento de medição de compressibilidade de materiais de atrito conforme a norma ISO 6310, por meio do 1ª ciclo de compressibilidade, extrair a curva de deflexão do material de atrito x pressão para cada um dos materiais avaliados (a frio ou a quente, dependendo do efeito a ser avaliado). Esse procedimento permite a execução com pressão de 8 MPa, porém o ensaio é destrutivo, onde a peça é cortada em um corpo de provas de 50cm². Dessa forma, para a avaliação do efeito de chanfros e espessura de material de atrito, recorre-se à medição não destrutiva com carga alternativa de 5 MPa, com as pastilhas inteiras, medindo-se metade de sua área total por vez (91,8 cm² - sem chanfro ou 75,6 – com chanfros), ou seja, duas medições por peça.

Método de avaliação: Avaliar o comportamento das curvas de deformação do material de atrito. O pico da rampa de subida é tomado como o valor máximo de deformação da pastilha. Tais resultados são base para ajudar a explicar os resultados obtidos através do Método 2 descrito abaixo.

Quantidade de amostras por ensaio: 1 amostra de pastilha.

Método 2 (M2):

Equipamento de teste: utilizando o ADB instalado em seu respectivo dispositivo de testes e montado no dinamômetro inercial. O valor de *stroke* foi medido através de um dispositivo específico com um sensor de deslocamento linear acoplado a haste da câmara de freio. O ensaio é feito de forma estática, ou seja, sem o giro do disco, apenas com acionamentos da câmara de freio. O ADB apresentado pelo autor é o mesmo utilizado neste trabalho e descrito na Tabela 3.1.

Procedimento de teste: acionar o freio com pressões de atuação da câmara de freio de 1 a 10 bar (com incrementos de 1 em 1 bar), registrando o curso total para cada nível de pressão em diferentes amostras.

Método de avaliação: Avaliar o comportamento das curvas e pico máximo de *stroke* para as diferentes amostras.

Quantidade de amostras por ensaio: 2 amostra de pastilhas (1 do lado interno e 1 do lado externo do sistema de freios).

De uma forma resumida, o fluxograma do procedimento de análise apresentado por Santos et al, 2021, pode ser mostrado através da Figura A.1 abaixo.

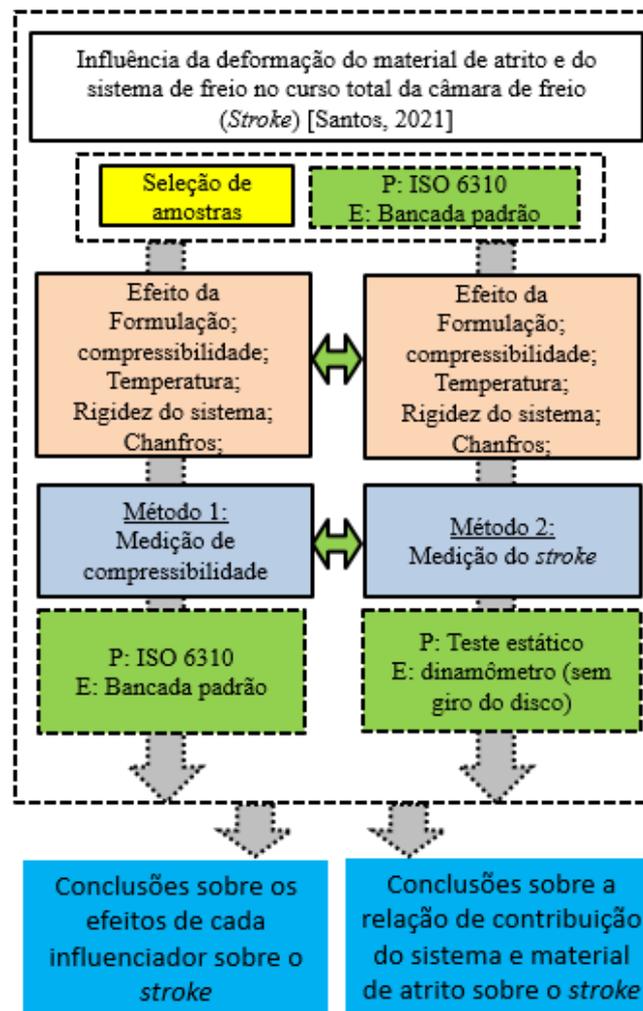


Figura A.1 – Fluxograma do método de ensaios proposto por Santos et al, 2021. [Fonte: o autor]

APÊNDICE C Método de medição de dureza Gogan.

Conforme descrito por Pavlak, 2021, os ensaios de dureza Gogan são realizados conforme o método da NBR 5520:1991 utilizando o equipamento Gogan modelo 911. Por meio de uma ponteira cilíndrica de 25,4 mm de diâmetro, a máquina aplica uma pré-carga na amostra de material de fricção diretamente na superfície de atrito e, por fim, avança até valores de carga estabelecidos pela norma. O valor de dureza representa a distância de avanço da ponteira, sendo que o deslocamento é registrado até que a ponteira atinja a força limite. Esse ensaio é utilizado pela indústria de material de fricção, sendo usualmente uma característica de controle de qualidade, e tratada como uma medida de compressibilidade superficial. É importante saber que materiais de fricção menos compressíveis (mais rígidos) apresentam valores baixos de dureza Gogan, enquanto materiais mais compressíveis (mais flexíveis), apresentam valores maiores de dureza.