

CENTRO PAULA SOUZA

FATEC SANTO ANDRÉ

Tecnologia em Eletrônica Automotiva

CAIO DE MARCHI

WELLINGTON SOARES DA SILVA

EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE FREIOS VEICULARES

Santo André

2025

**CAIO DE MARCHI
WELLINGTON SOARES DA SILVA**

EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE FREIOS VEICULARES

Trabalho apresentado à banca examinadora da Faculdade de Tecnologia de Santo André como requisito para a conclusão do curso de eletrônica automotiva

Orientador : Prof. Dr. Edson C. Kitani

**Santo André
2025**

M317e

Marchi, Caio de

Evolução dos sistemas de freio veiculares / Caio de Marchi,
Wellington Soares da Silva. - Santo André, 2025. – 59f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Edson Caoru Kitani

1. Eletrônica. 2. Veículos. 3. Sistemas de freios. 4. Tecnologia.
5. Sistemas de frenagem. 6. Tipos de freios. 7. Sistemas ABS. 8.
Desenvolvimento. 9. Pesquisa. 10. Análise. 11. Estudo. I. Silva,
Wellington Soares da. II. Evolução dos sistemas de freio
veiculares.

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 28 de junho de 2025.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE FREIOS VEICULARES” DOS ALUNOS DO
6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

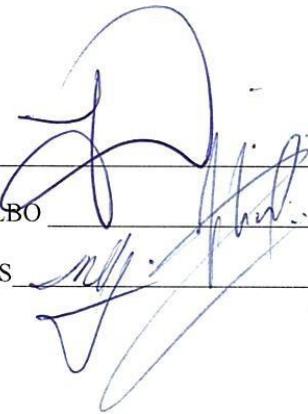
PRESIDENTE:

PROF. EDSON CAORU KITANI

MEMBROS:

PROF. FERNANDO GARUP DALBO

PROF. MARCO AURÉLIO FRÓES

**ALUNOS:**CAIO DE MARCHI Caio de MarchiWELLINGTON SOARES DA SILVA Wellington Soares da Silva

AGRADECIMENTOS

Dedicamos este trabalho, primeiramente, a Deus, por nos guiar, fortalecer e iluminar o caminho durante toda a nossa trajetória acadêmica.

Aos nossos familiares que: com carinho, paciência e incentivo incondicional estiveram ao nosso lado nos momentos mais desafiadores. Cada gesto de apoio foi essencial para que este sonho se concretizasse.

Aos professores que: com dedicação e compromisso, contribuíram para a nossa formação e para o desenvolvimento deste trabalho. Dedicamos um ao outro, por termos caminhados juntos nesta jornada, com respeito, parceria e determinação. A confiança e o empenho mútuo tornaram este projeto possível.

“A tecnologia move o mundo.
Mas é o conhecimento que
define para onde vamos”.

(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada dos sistemas de frenagem automotiva, abordando desde os princípios básicos até as tecnologias mais avançadas utilizadas atualmente. Inicialmente, é realizada uma revisão histórica dos freios, seguida pela descrição dos diferentes tipos de fluidos e sistemas hidráulicos envolvidos na frenagem. Em seguida, são discutidos os principais tipos de freios, incluindo freios a tambor, a disco, discos ventilados e discos de cerâmica a carbono, exemplificados com aplicações em veículos comerciais. A pesquisa avança para a análise das tecnologias modernas, como sistemas ABS, controle de tração, controle de estabilidade e *brake by wire*, destacando suas funções, benefícios e veículos que as empregam. Uma comparação entre veículos equipados e não equipados com essas tecnologias é apresentada para evidenciar os avanços em segurança e eficiência. Por fim, são discutidas as perspectivas futuras para o desenvolvimento dos sistemas de frenagem automotiva. O estudo contribui para o entendimento técnico desses sistemas e sua importância na segurança veicular, oferecendo subsídios para pesquisas e desenvolvimentos futuros.

Palavras chave: Sistemas de frenagem; Segurança veicular; Freios automotivos; Tecnologias de frenagem; *Brake by Wire*; ABS e controle de estabilidade.

ABSTRACT

This work presents a detailed analysis of automotive braking systems, covering from basic principles to the most advanced technologies currently in use. Initially, a historical review of brakes is conducted, followed by a description of different brake fluids and hydraulic systems involved in braking. Then, the main types of brakes are discussed, including drum brakes, disc brakes, ventilated discs, and carbon-ceramic discs, with examples of their applications in commercial vehicles. The research progresses to an analysis of modern technologies such as ABS, traction control, stability control, and brake-by-wire systems, highlighting their functions, benefits, and the vehicles that employ them. A comparison between vehicles equipped and not equipped with these technologies is presented to demonstrate advances in safety and efficiency. Finally, future perspectives for the development of automotive braking systems are discussed. This study contributes to the technical understanding of these systems and their importance in vehicle safety, providing a foundation for future research and development.

Keywords Braking systems; Vehicle safety; Automotive brakes; Braking technologies; Brake-by-Wire; ABS and stability control.

Lista de Figuras

Figura 1 – Linha do tempo ilustrando a evolução do sistema de freios veiculares.	19
Figura 2 – Estrutura básica de um sistema de freio Hidráulico	22
Figura 3 – Sistema de freio a tambor.....	26
Figura 4 – Componentes de um Sistema de Freio a Disco sólido.....	27
Figura 5 – Disco de freio ventilado.....	29
Figura 6 – Disco de freio de cerâmica a carbono	30
Figura 7 – Sistema ABS em frenagem	37
Figura 8 – Sistema de controle de estabilidade (ESC) durante curva em alta velocidade	39
Figura 9 – Sistema de controle de estabilidade (ESC) durante desvio de trajetória em alta velocidade	40
Figura 10 – Sistema de controle de tração (TCS)	42
Figura 11 – Componentes do sistema <i>Brake by Wire</i>	45

Lista de Quadros

Quadro 1 - Evolução do sistema de freios veiculares	20
Quadro 2 - Comparaçao entre os tipos de fluido de freio.....	25
Quadro 3 - Comparativo entre os tipos de discos de freio	31
Quadro 4 - Sistemas eletrônicos auxiliares de freio, ABS, TCS e ESC.....	41
Quadro 5 - Comparativo entre veículos com e sem sistemas avançados	50

Lista de Abreviaturas

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas

ABS - *Anti lock Braking System* (Sistema de Freios Antiblocantes)

BBW - *Brake by Wire* (Sistema de frenagem eletrônica)

CFC - Centro de Formação de Condutores

DOT - *Department of Transportation* (Departamento de Transporte dos EUA - padrão para fluido de freio)

ECU - *Electronic Control Unit* (Unidade de Controle Eletrônico)

ESC - *Electronic Stability Control* (Controle Eletrônico de Estabilidade)

F1 - Fórmula 1

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ISSO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

Kgf – Quilograma-força

Km/h – Quilômetros por hora

NHTSA – *National Highway Traffic Safety Administration* (Administração Nacional de Segurança no Trânsito dos EUA)

NBR – Normal brasileira

Nm – *Newton metro* (unidade de torque)

SAE – *Society of Automotive Engineers* (Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade)

SiC – Carboneto de silício

TCS - *Traction Control System* (Sistema de Controle de Tração)

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Desempenho de frenagem 51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação	14
1.2 Metas e Objetivo	14
1.3 Organização Textual.....	15
2. PRINCÍPIO DE FRENAGEM	16
2.1 História do Freio	17
2.2 Sistema Hidráulico de Frenagem.....	21
2.4 Freio a Tambor	25
2.5 Freio a Disco sólido.....	26
2.6 Freio a Disco Ventilado.....	28
2.7 Disco de Cerâmica de Carbono	29
2.8 Sensores de Desgaste das Pastilhas de Freio	31
2.9 Sistema de freio de estacionamento	32
2.10 Considerações sobre a evolução do sistema	33
3. TECNOLOGIA ATUAL DO SISTEMA DE FRENAGEM	35
3.1 Sistema ABS – <i>Antilock Braking System</i>.....	36
3.2 Controle de Estabilidade (ESC – <i>Electronic Stability Control</i>).....	37
3.3 Controle de Tração (TCS – <i>Traction Control System</i>)	41
3.4 Veículo com Todas as Tecnologias Integradas	43
3.5 <i>Brake by Wire</i>	44
3.6 Evolução do <i>Brake by Wire</i>.....	46
3.7 Normas Técnicas Aplicadas aos Sistemas de Freio	47
4. ANÁLISE DO SISTEMA E COMPARAÇÃO.....	49
4.1 Considerações Técnicas	50
5. CONCLUSÃO	53
5.1 Propostas Futuras.....	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
GLOSSÁRIO	59

1. INTRODUÇÃO

A frenagem automotiva representa um dos sistemas fundamentais para a segurança veicular, sendo responsável por garantir o controle do veículo em diferentes condições de condução. Conforme destacado por (MIRANDA, 2018), esse sistema atua convertendo a energia cinética em energia térmica por meio do atrito, processo que permite desacelerar e imobilizar o veículo com segurança. Segundo (CARVALHO, 2019), a evolução tecnológica tem transformado profundamente os sistemas de frenagem, que deixaram de ser exclusivamente mecânicos e passaram a incorporar soluções hidráulicas, eletrônicas e digitais. De acordo com (BOSCH, 2021) entre as tecnologias mais presentes nos veículos atuais, destacam-se o sistema ABS (*Anti lock Braking System*), o controle eletrônico de estabilidade (ESC) e o sistema *Brake by Wire*, que elevam os níveis de precisão e segurança da frenagem em situações adversas (BLÁZQUEZ, 2020, (GONÇALVES, PEREIRA, 2023). Esses avanços refletem a busca contínua da indústria automotiva por soluções mais eficazes, que aliam desempenho, conforto e segurança. Segundo (KLEIN, 2022), as inovações aplicadas à frenagem são parte essencial da transição para veículos mais autônomos e inteligentes. A relevância do tema justifica-se pelo impacto direto dos sistemas de freio na prevenção de acidentes e na estabilidade veicular, como ressaltam (CAMPOS, 2022) e (SANTOS, 2012).

1.1 Motivação

Há uma crescente preocupação com a segurança no trânsito, aliada a evolução tecnológica automotiva, tornando-se essencial o estudo aprofundado dos sistemas de frenagem. Com o aumento significativo do número de veículos nas ruas e rodovias, é indispensável contar com sistemas eficazes para reduzir acidentes e preservar vidas.

1.2 Metas e Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo técnico e analítico sobre os sistemas de frenagem automotiva, desde seus fundamentos mecânicos e hidráulicos até as

tecnologias mais recentes voltadas à segurança veicular. A proposta visa abordar de forma abrangente os diferentes tipos de freios e suas aplicações, destacando os avanços que contribuíram para a eficiência e confiabilidade desses sistemas.

As metas específicas que orientam esta pesquisa são:

- Apresentar uma visão abrangente dos sistemas de frenagem automotiva, explorando desde os princípios básicos até as inovações mais recentes;
- Descrever os diferentes tipos de freios e fluidos utilizados, explicando suas funcionalidades, aplicações e implicações práticas.
- Analisar tecnologias modernas de segurança veicular ligadas à frenagem, como o ABS (sistema antitravamento), controle de tração, controle eletrônico de estabilidade (ESC) e sistemas *brake by wire*.
- Comparar veículos equipados com essas tecnologias e aqueles que utilizam sistemas convencionais, evidenciando as principais vantagens, limitações e impactos sobre a condução.
- Apontar possibilidades para o desenvolvimento futuro dos sistemas de frenagem, considerando tendências da indústria automotiva e os desafios relacionados à segurança.

1.3 Organização Textual

Este trabalho está dividido em cinco capítulos principais. O Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema e os aspectos que motivaram a escolha do objeto de estudo. O Capítulo 2 aborda os fundamentos e o funcionamento dos sistemas de frenagem, com destaque para os freios a tambor, freios a disco, sistema hidráulico e os fluidos utilizados. O Capítulo 3 analisa as tecnologias atuais, como ABS, ESC, TCS e *Brake by Wire*, explicando suas funções e aplicações práticas. O Capítulo 4 apresenta uma análise comparativa entre sistemas com e sem tecnologias de frenagem avançadas, discutindo aspectos técnicos e de segurança. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho e propõe sugestões para futuros desenvolvimentos e pesquisas na área.

2. PRINCÍPIO DE FRENAGEM

A frenagem consiste no processo de redução da velocidade ou parada total de um veículo por meio da conversão da energia cinética em energia térmica, gerada principalmente pelo atrito entre componentes móveis e fixos do sistema de freios. Fundamentada na Lei da Conservação da Energia, essa transformação é essencial para a segurança veicular, permitindo ao condutor controlar o movimento e a estabilidade do veículo em diferentes condições de tráfego, carga e terreno (CARVALHO, 2019) e (MIRANDA, 2018).

O funcionamento eficiente dos sistemas de freio depende da integração precisa entre componentes mecânicos e hidráulicos, que transmitem a força exercida no pedal até os mecanismos de frenagem nas rodas. Neste processo, os princípios da hidráulica são fundamentais, visto que o fluido de freio atua como meio transmissor da pressão do cilindro mestre para os cilindros das rodas ou pistões das pinças (ANDRADE, 2020) e (BOSCH, 2021).

A dissipação de calor é outro fator crítico no desempenho do sistema de frenagem. Ao converter energia cinética em calor, o sistema precisa suportar elevadas temperaturas sem perda de eficiência, evitando o fenômeno conhecido como fadiga, que ocorre pelo superaquecimento dos componentes e consequente redução da força de frenagem, (HOBBS, 2022). Por isso, o dimensionamento adequado de discos, pastilhas, tambores e sapatas, além da correta seleção do fluido de freio, é determinante para a segurança e durabilidade do sistema.

Historicamente, os sistemas de frenagem evoluíram de mecanismos puramente mecânicos, como os freios a cinta e a tambor acionados por cabos, para sistemas hidráulicos e, posteriormente, para tecnologias assistidas eletronicamente, incluindo o ABS e o controle eletrônico de estabilidade (ESC). Essa transformação, foi impulsionada por normas regulatórias e pela busca constante da indústria por maior segurança e desempenho (SILVA, 2019) e (GONÇALVES, PEREIRA, 2023).

Como destaca a Resolução nº 380/2011 do Conselho Nacional de Trânsito e a norma NBR 14019 da ABNT, a obrigatoriedade de sistemas como o ABS e a padronização dos requisitos técnicos demonstram o papel regulador do Estado na segurança veicular.

No que tange aos fluidos de freio, sua classificação segue normas específicas relacionadas ao ponto de ebulição e viscosidade, parâmetros que

influenciam diretamente a resposta e confiabilidade do sistema. Conforme a (NBR 14019, 2010) da ABNT, Sendo os tipos mais comuns os DOT 3, DOT 4 e DOT 5.1. Este capítulo também apresenta uma análise comparativa dos principais tipos de freios utilizados atualmente, como os freios a tambor, a disco e os sistemas regenerativos, complementada por exemplos reais extraídos dos catálogos técnicos atualizados de veículos de passeio e comerciais, como o Toyota Corolla GLi 2023, o Jeep Compass 2023 e o Honda Civic 2023, todos equipados com sistemas ABS, controle eletrônico de estabilidade e freios a disco, evidenciando a evolução e a aplicação das tecnologias modernas de frenagem no mercado brasileiro.

2.1 História do Freio

Desde os primórdios da locomoção, a necessidade de controlar a velocidade e interromper o movimento de veículos representou uma prioridade fundamental para a segurança dos ocupantes e a funcionalidade do transporte. As primeiras tentativas de frenagem surgiram ainda nas carroças puxadas por animais, com o uso de calços de madeira aplicados diretamente sobre as rodas, criando atrito para reduzir a velocidade. Esse sistema rudimentar, descrito por (MIRANDA, 2018) já demonstrava a preocupação com a estabilidade e o controle, mesmo em velocidades muito baixas.

Com o surgimento dos veículos motorizados no final do século XIX, a demanda por sistemas de frenagem mais eficazes cresceu proporcionalmente. Os primeiros carros passaram a adotar freios mecânicos acionados por alavancas, hastes ou cabos que transferiam diretamente a força do condutor até as rodas ou eixos (ANDRADE, 2020). Apesar de simples, esses sistemas exigiam muito esforço físico e apresentavam baixa eficiência, sobretudo em emergências ou em veículos mais pesados (CARVALHO, 2019). A limitação do controle e a dificuldade de manutenção tornaram evidente a necessidade de inovação.

Um marco técnico ocorreu em 1918, com a introdução do freio a tambor pelo engenheiro Malcolm Loughead, fundador da *Lockheed*. Esse sistema utilizava sapatas internas que pressionavam a superfície do tambor conectado à roda, gerando atrito de forma mais distribuída e eficaz. Como aponta (SILVA, 2019), esse avanço trouxe maior capacidade de frenagem, especialmente em veículos mais pesados e em declives, representando um salto de desempenho e segurança.

A próxima grande evolução foi a introdução da frenagem hidráulica em 1924, que substituiu o acionamento mecânico por um sistema de fluidos. Segundo (BOSCH, 2016), esse sistema utilizava fluido de freio pressurizado para transmitir a força do pedal às rodas, permitindo frenagens mais suaves, com menor esforço do condutor e melhor distribuição da força entre os eixos. O sistema também proporcionou resposta mais rápida e confiável, embora ainda exigisse manutenção cuidadosa devido à possibilidade de vazamentos ou bolhas de ar.

Com o aumento da velocidade dos veículos e a exigência por maior desempenho, os freios a disco começaram a ser introduzidos em larga escala a partir da década de 1950, inicialmente em carros esportivos e posteriormente em veículos de passeio. Segundo (MIRANDA, 2018) e (HOBBS, 2022) os discos oferecem dissipação de calor mais eficiente e melhor desempenho em frenagens repetidas, reduzindo o efeito de fadiga perda de eficiência causada pelo superaquecimento, muito comum em sistemas a tambor.

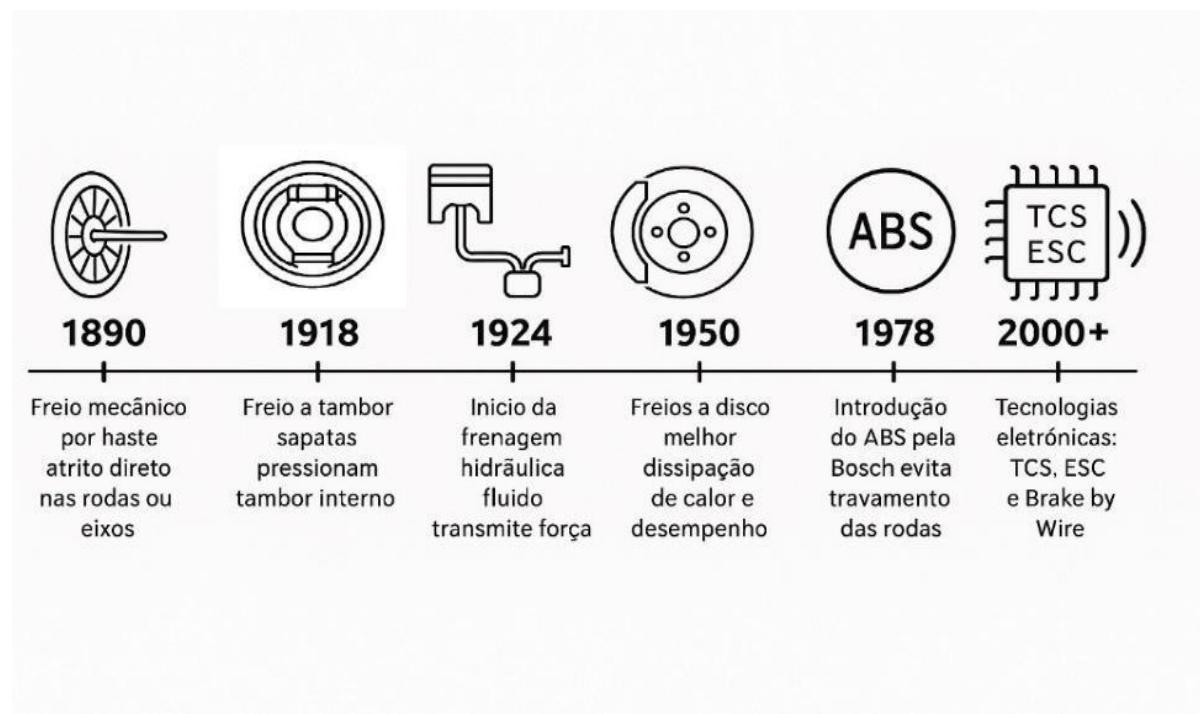
Nos anos 1970, uma inovação revolucionária surgiu com o sistema ABS (*Anti-lock Braking System*), desenvolvido pela Bosch e implementado em carros de produção a partir de 1978. A função principal do ABS era evitar o travamento das rodas durante frenagens bruscas, mantendo a dirigibilidade do veículo e evitando derrapagens, principalmente em pisos molhados. Segundo (BOSCH, 2021) o sistema ajusta automaticamente a pressão de frenagem em frações de segundo por meio de sensores e módulos eletrônicos, trazendo um novo patamar de segurança veicular.

Com o avanço da eletrônica embarcada nas décadas seguintes, os sistemas de frenagem passaram a incorporar módulos de controle como o TCS (*Traction Control System*) e o ESC (*Electronic Stability Control*). Segundo (BOSCH, 2016), o TCS impede o escorregamento das rodas motrizes durante acelerações em superfícies escorregadias, enquanto o ESC atua para corrigir a trajetória do veículo em curvas ou manobras de emergência, evitando saídas de pista ou capotamentos. Esses sistemas trabalham de forma integrada ao ABS, utilizando sensores e atuadores para controlar cada roda de forma individual, garantindo estabilidade e aderência.

Mais recentemente, a partir da década de 2010, emergiu o *sistema brake by wire*, que substitui completamente os componentes mecânicos e hidráulicos por sinais elétricos digitais. Como descrito por (CAMPOS, 2022), (BLÁZQUEZ, 2020), (GONÇALVES, PEREIRA, 2023), essa tecnologia permite resposta ultrarrápida,

melhor integração com os sistemas autônomos e redução de peso nos veículos. No entanto, exige níveis altos de segurança funcional e redundância eletrônica, motivo pelo qual é regulada por normas como a ISO 26262. A Figura 1, ilustra uma linha do tempo que representa a progressão histórica do sistema de freio automotivo. Em seguida o Quadro 1, apresenta uma visão clara e notável evolução dos sistemas de freios ao longo dos anos, acompanhada de uma justificativa técnica que evidencia as principais mudanças ocorridas no período.

Figura 1 - Linha do tempo ilustrando a evolução do sistema de freios veiculares.



Fonte: (Elaborada pelos autores, 2025).

Quadro 1 – Evolução do sistema de freios veiculares

Época / Ano	Tecnologia Introduzida	Justificativa Técnica
Século XIX	Freio mecânico por alavanca	Simplicidade mecânica, porém, exigia grande esforço físico e apresentava baixa eficiência
1918	Freio a tambor (Malcolm Loughead)	Maior eficiência de frenagem e melhor adaptação a veículos pesados
1924	Freio hidráulico	Distribuição uniforme da força, menor esforço do condutor e maior controle de frenagem
1950–1960	Freio a disco	Melhor dissipação de calor, menor risco de fading e maior estabilidade em frenagens repetidas
1978	Sistema ABS	Impede o travamento das rodas, mantém a dirigibilidade e reduz acidentes em frenagens bruscas
1990 em diante	TCS e ESC	Controle de tração e estabilidade em curvas e pisos escorregadios, aumentando a segurança
2010 em diante	Brake-by-Wire	Elimina componentes mecânicos, aumenta a precisão da frenagem e facilita integração com sistemas eletrônicos

Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base em Miranda (2018), Bosch (2016 e 2021), Silva (2019), Hobbs (2022), Campos (2022) e Blázquez (2020).

Essa evolução histórica evidencia o acompanhamento dos sistemas de frenagem ao progresso da engenharia automotiva, refletindo diretamente na segurança, eficiência operacional e conforto dos ocupantes. Além disso, ressalta a importância da regulamentação e da inovação contínua como motores do desenvolvimento de soluções cada vez mais eficazes para os desafios da mobilidade contemporânea, segundo as normas do Conselho Nacional de Trânsito e da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

2.2 Sistema Hidráulico de Frenagem

O sistema hidráulico de frenagem constitui a base do funcionamento da maioria dos veículos automotores modernos, incluindo aqueles equipados com freios a tambor ou a disco. Sua principal função é transmitir, de forma eficiente e precisa, a força aplicada pelo condutor no pedal até os componentes responsáveis pela frenagem nas rodas, por meio do deslocamento do fluido de freio, que é praticamente incompressível. Essa característica é fundamental para garantir uma resposta rápida e eficaz ao comando do motorista, (ANDRADE, 2020).

Os componentes essenciais que compõem esse sistema incluem o pedal de freio, onde o condutor exerce a força inicial; o cilindro mestre, que converte a força mecânica aplicada no pedal em pressão hidráulica no fluido; o reservatório de fluido, geralmente transparente para facilitar a inspeção do nível; as tubulações hidráulicas, que conduzem o fluido sob pressão até os cilindros das rodas ou pinças de freio, e finalmente os cilindros de roda em sistemas a tambor ou pinças em sistemas a disco, que convertem essa pressão novamente em força mecânica, pressionando as sapatas ou pastilhas contra o tambor ou disco, gerando o atrito necessário para a desaceleração do veículo (CARVALHO, 2019) e (MIRANDA, 2018).

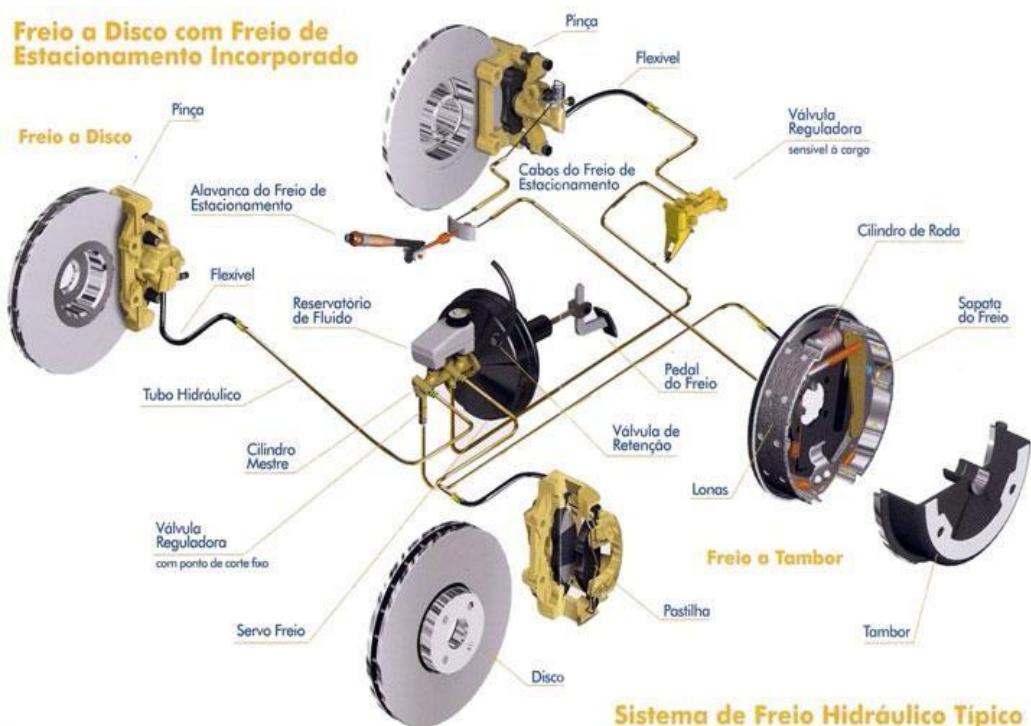
O funcionamento do sistema hidráulico pode ser resumido em uma sequência: o condutor pisa no pedal do freio, cuja força é amplificada pelo servofreio quando presente, transmitindo pressão ao cilindro mestre. Este, por sua vez, pressuriza o fluido de freio que percorre as tubulações até as pinças ou cilindros das rodas. O contato das sapatas ou pastilhas com o tambor ou disco gera o atrito que reduz a velocidade do veículo (BOSCH, 2010).

Entre as vantagens do sistema hidráulico destacam-se a rapidez e uniformidade na resposta à ação do motorista, a distribuição equilibrada da força de frenagem entre as rodas, a redução do esforço necessário para acionar os freios, especialmente com o auxílio do servofreio, e a possibilidade de integração com sistemas eletrônicos modernos como o ABS e controle de tração (HOBBS, 2022). Contudo, o sistema também apresenta limitações: o fluido de freio é higroscópico e pode absorver umidade ao longo do tempo, o que reduz seu ponto de ebulição e compromete a eficiência da frenagem, exigindo a substituição periódica do fluido. Além disso, possíveis vazamentos nas mangueiras ou nos cilindros podem levar à

perda total da pressão hidráulica e, consequentemente, falha do sistema (SILVA, 2019).

Portanto, a manutenção adequada do sistema hidráulico, incluindo inspeções regulares e troca do fluido, é indispensável para garantir a segurança e a confiabilidade do processo de frenagem em veículos automotores modernos. Na Figura 2, temos a ilustração de uma estrutura básica de freio hidráulico.

Figura 2 – Estrutura básica de um sistema de freio Hidráulico.



Fonte: (Blog do Professor Carlos, 2009)

2.3 Fluidos de Freio DOT e Suas Classificações

O fluido de freio desempenha um papel essencial no funcionamento dos sistemas hidráulicos de frenagem, sendo o responsável por transmitir a força exercida pelo condutor no pedal até os componentes de atuação localizados nas rodas. Por tratar-se de um sistema fechado e sujeito a elevações térmicas significativas, a escolha adequada do fluido é determinante para assegurar a eficiência, a segurança e a durabilidade do sistema. O sistema hidráulico de frenagem constitui a base do funcionamento da maioria dos veículos automotores modernos, incluindo aqueles equipados com freios a tambor ou a disco. Sua principal função é transmitir, de forma

eficiente e precisa, a força aplicada pelo condutor no pedal até os componentes responsáveis pela frenagem nas rodas, por meio do deslocamento do fluido de freio, que é praticamente incompressível. Essa característica é fundamental para garantir uma resposta rápida e eficaz ao comando do motorista, conforme explica (ANDRADE, 2020).

Os componentes essenciais que compõem esse sistema incluem o pedal de freio, onde o condutor exerce a força inicial; o cilindro mestre, responsável por converter a força mecânica aplicada no pedal em pressão hidráulica no fluido; o reservatório de fluido, geralmente transparente para facilitar a inspeção do nível; as tubulações hidráulicas, que conduzem o fluido sob pressão até os cilindros das rodas ou pinças de freio; e, por fim, os cilindros de roda em sistemas a tambor ou as pinças em sistemas a disco, que transformam essa pressão novamente em força mecânica, pressionando as sapatas ou pastilhas contra o tambor ou disco, gerando o atrito necessário para a desaceleração do veículo, como descrevem (CARVALHO, 2019) e (MIRANDA, 2018).

O funcionamento do sistema hidráulico pode ser resumido em uma sequência: o condutor aciona o pedal do freio, cuja força é amplificada pelo servofreio, quando presente, transmitindo pressão ao cilindro mestre. Este, por sua vez, pressuriza o fluido de freio que percorre as tubulações até as pinças ou cilindros das rodas. O contato das sapatas ou pastilhas com o tambor ou disco gera o atrito responsável pela redução da velocidade do veículo, segundo (BOSCH, 2010).

Entre as vantagens do sistema hidráulico, destacam-se a rapidez e uniformidade na resposta à ação do motorista, a distribuição equilibrada da força de frenagem entre as rodas, a redução do esforço necessário para acionar os freios especialmente com o auxílio do servofreio e a possibilidade de integração com sistemas eletrônicos modernos como o ABS e o controle de tração, conforme aponta (HOBBS, 2022). Contudo, o sistema também apresenta limitações: o fluido de freio é higroscópico e tende a absorver umidade ao longo do tempo, o que reduz seu ponto de ebulição e compromete a eficiência da frenagem, exigindo substituição periódica. Além disso, vazamentos nas mangueiras ou nos cilindros podem causar perda de pressão hidráulica e falhas no sistema, como ressalta (SILVA, 2019).

Portanto, a manutenção adequada do sistema hidráulico incluindo inspeções regulares e a substituição periódica do fluido é indispensável para garantir a

segurança e a confiabilidade do processo de frenagem em veículos automotores modernos.

A classificação dos fluidos de freio segue os padrões estabelecidos pelo DOT (*Department of Transportation*), que os categoriza com base em critérios como ponto de ebulação (seco e úmido), composição química e compatibilidade com diferentes sistemas. No Brasil, essas especificações são regulamentadas por meio da norma ABNT NBR 14019, que estabelece a terminologia e os requisitos mínimos para os sistemas de freio em veículos rodoviários automotores.

Entre os tipos mais utilizados, o fluido DOT 3 é amplamente empregado em veículos leves e de uso urbano. Formulado à base de glicol, apresenta ponto de ebulação seco em torno de 205 °C e ponto úmido próximo de 140 °C. Por ser higroscópico, tende a absorver umidade ao longo do tempo, o que reduz sua eficiência e exige substituições regulares.

O fluido DOT 4, também à base de glicol, possui formulação aprimorada, com aditivos que aumentam a resistência térmica. Seu ponto de ebulação seco gira em torno de 230 °C, enquanto o ponto úmido atinge cerca de 155 °C. É recomendado para veículos que operam em condições mais exigentes, como aqueles com freios a disco nas quatro rodas ou que enfrentam situações de tráfego intenso (BOSCH, 2021).

Em contraste, o fluido DOT 5 apresenta uma composição à base de silicone, sendo não higroscópico, ou seja, não absorve umidade do ambiente. Com ponto de ebulação seco superior a 260 °C, oferece excelente resistência térmica. No entanto, sua incompatibilidade com sistemas que utilizam DOT 3 ou DOT 4 restringe sua aplicação a veículos específicos, como militares, clássicos ou de coleção (HOBBS, 2022).

Por fim, o fluido DOT 5.1 mantém a base glicol, como o DOT 4, mas com desempenho térmico ainda mais elevado. Seu ponto de ebulação seco ultrapassa 270 °C, tornando-o ideal para veículos de alto desempenho, esportivos ou que atuam em condições extremas de operação, como em competições automotivas. Essa classificação é analisada em profundidade (GONÇALVES e PEREIRA, 2023).

A escolha correta do fluido, associada à manutenção periódica do sistema, é fundamental para evitar falhas como o superaquecimento e a formação de bolhas de vapor, que prejudicam a pressão hidráulica e comprometem a resposta do freio. Dessa forma, o conhecimento técnico sobre as características e aplicações dos diferentes tipos de fluido é indispensável para garantir a *performance* e a segurança

dos sistemas de frenagem modernos. O Quadro 2 apresenta uma comparação entre os tipos de fluido de freio.

Quadro 2 – Comparação entre os tipos de fluido de freio

Classificação	Base Química	Ponto de Ebulação Seco (°C)	Ponto de Ebulação Úmido (°C)	Aplicações Recomendadas
DOT 3	Glicol	205	140	Carros comuns
DOT 4	Glicol	230	155	Veículos com freio a disco
DOT 5	Silicone	260	180	Veículos militares e veículos antigos
DOT 5.1	Glicol	270	190	Veículos esportivos e de alto desempenho

Fonte: Elaborado pelos autores (2025) com base em (Bosch, 2010), (Sae international, 2016) e (Denso, 2020).

2.4 Freio a Tambor

O freio a tambor é um dos sistemas de frenagem mais antigos e permanece amplamente utilizado em veículos modernos, especialmente nas rodas traseiras de carros populares devido à sua eficiência em condições específicas e ao baixo custo de produção. Seu princípio de funcionamento baseia-se na expansão de duas sapatas de freio, contra a superfície interna de um tambor metálico que gira acoplado à roda, gerando o atrito necessário para desacelerar o veículo (CARVALHO, 2019) e (MIRANDA, 2018).

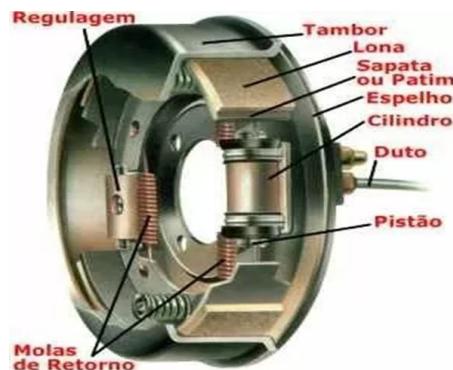
Quando o condutor aciona o pedal do freio, o fluido hidráulico pressiona os pistões localizados no cilindro da roda, que por sua vez, empurram as sapatas para fora, fazendo com que estas entrem em contato com a superfície interna do tambor. O atrito resultante dessa ação reduz a rotação do tambor e, consequentemente, da roda, promovendo a desaceleração do veículo (ANDRADE, 2020).

Esse tipo de sistema é amplamente utilizado no eixo traseiro de veículos de passeio, especialmente em modelos de entrada, por apresentar custo mais acessível de produção e manutenção. Apesar de ter menor capacidade de

dissipação térmica em comparação aos freios a disco, o freio a tambor oferece boa eficiência em situações de carga moderada, sendo valorizado pela sua durabilidade e resistência ao desgaste (SANTOS, 2012).

Além disso, o *design* fechado do tambor protege os componentes internos contra poeira, lama e detritos, o que contribui para a longevidade do sistema em condições adversas de rodagem. No entanto, esse mesmo fechamento pode dificultar a ventilação e levar a fadiga térmica em frenagens prolongadas (CARVALHO, 2019). A Figura 3 ilustra um sistema de freio a tambor.

Figura 3 - Sistemas do freio a tambor



Fonte: (Lopes, 2023)

Os principais componentes do freio a tambor incluem: o tambor propriamente dito, peça cilíndrica conectada diretamente à roda e que gira juntamente com ela, as sapatas ou patim de freio, que atuam como elementos de atrito, o cilindro da roda, responsável por acionar as sapatas por meio da pressão hidráulica, as molas de retorno que recolhem o patim após o término da frenagem, e a placa de apoio que serve de base para a fixação dos demais componentes (BOSCH, 2010).

2.5 Freio a Disco sólido

O freio a disco é um sistema hidráulico de frenagem que atua por meio da pressão exercida sobre pastilhas de freio, que entram em contato com um disco metálico conectado ao cubo da roda, gerando o atrito necessário para reduzir a velocidade do veículo. Em comparação ao freio a tambor, o sistema a disco apresenta maior eficiência na dissipação de calor, melhor desempenho em frenagens repetidas

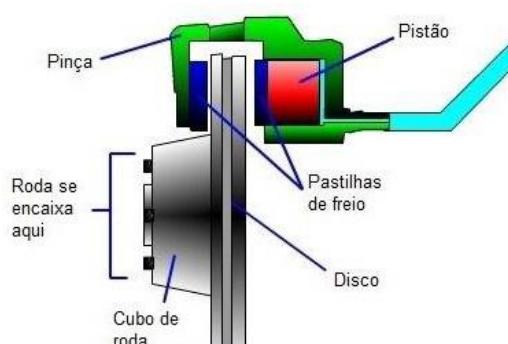
ou de emergência, além de proporcionar uma resposta mais rápida e precisa ao comando do condutor. Por essas características, tornou-se o sistema predominante nas rodas dianteiras da maioria dos veículos modernos, e frequentemente é adotado em todas as rodas em modelos mais avançados (CARVALHO, 2019) e (MIRANDA, 2018).

No funcionamento típico, ao pressionar o pedal do freio, o cilindro mestre envia fluido hidráulico para as pinças, que abrigam os êmbolos ou pistões responsáveis por aplicar força sobre as pastilhas. Essas pastilhas pressionam o disco em rotação, gerando o atrito que desacelera gradativamente a roda (ANDRADE, 2020) e (BOSCH, 2010).

Os componentes principais desse sistema incluem o disco de freio, que pode ser sólido, ventilado ou perfurado para otimizar a dissipação térmica; as pastilhas, que funcionam como elementos de atrito; as pinças de freio, que mantêm as pastilhas alinhadas ao disco e alojam os pistões; e os próprios pistões, que aplicam a pressão hidráulica às pastilhas (SILVA, 2019).

Dentre as vantagens do freio a disco destacam-se o desempenho superior em frenagens intensas e repetidas, a redução do risco de fadiga causado pelo superaquecimento, a resposta rápida ao acionamento do pedal e a facilidade de inspeção e manutenção, uma vez que os discos e pastilhas são mais acessíveis visualmente (HOBBS, 2022). Por outro lado, este sistema possui custos de fabricação e manutenção mais elevados, requerendo atenção especial à qualidade dos discos e à frequência da troca das pastilhas, que podem se desgastar mais rapidamente em condições severas de uso (GONÇALVES e PEREIRA, 2023). A Figura 4 ilustra os componentes de um sistema de freio a disco sólido.

Figura 4 – Componentes de um Sistema de Freio a Disco sólido



Fonte: (SOUZA, 2024)

2.6 Freio a Disco Ventilado

O disco ventilado é uma evolução do freio a disco convencional, desenvolvido para otimizar a dissipação de calor durante a frenagem, sobretudo em situações de uso severo, como em condução esportiva ou veículos de maior porte. Seu *design* apresenta duas superfícies paralelas unidas por aletas ou canais internos, que permitem a circulação de ar entre elas, promovendo a troca térmica e reduzindo significativamente a temperatura do disco durante a operação (BOSCH, 2010) e (MIRANDA, 2018).

O superaquecimento dos discos pode acarretar o fenômeno conhecido como fadiga térmica, caracterizado pela perda temporária da eficiência de frenagem devido à diminuição do coeficiente de atrito, o que aumenta a distância necessária para parar o veículo e compromete a segurança. O disco ventilado minimiza esse risco ao manter temperaturas mais baixas e estabilidade térmica, assegurando desempenho consistente mesmo em frenagens repetidas ou prolongadas (HOBBS, 2022) e (SILVA, 2019).

Entre as principais características do disco ventilado destacam-se a presença de dois discos paralelos interligados por canais internos, que favorecem a circulação de ar e a troca de calor; a capacidade de reduzir efetivamente a temperatura da superfície de frenagem em comparação com discos sólidos e a manutenção de um coeficiente de atrito estável, resultando em frenagens mais seguras e previsíveis (ANDRADE, 2020).

Esse tipo de disco é amplamente utilizado em veículos de médio e grande porte, incluindo SUVs e automóveis de alto desempenho, pois, sua capacidade térmica aumenta a durabilidade do componente e das pastilhas de freio, além de reduzir o risco de empenamento do disco devido ao calor excessivo (CARVALHO, 2019). Um exemplo representativo é o Toyota Corolla 2023, que emprega freios a disco ventilado nas rodas dianteiras, garantindo eficiência e segurança mesmo em condições exigentes, como trânsito intenso e rodovias, característica comum em sedãs médios que requerem frenagens consistentes (TOYOTA DO BRASIL, 2023).

Os discos ventilados diferenciam-se dos discos sólidos, por possuírem canais internos ou aletas entre duas superfícies de frenagem, permitindo maior dissipação do calor gerado durante o atrito com as pastilhas.

Além da vantagem térmica, os discos ventilados também favorecem a redução do peso em comparação com soluções de maior espessura em discos sólidos, sem comprometer a rigidez estrutural. Essa combinação de desempenho térmico, durabilidade e leveza os torna ideais para veículos que exigem frenagens repetitivas ou intensas, como em descidas longas ou condução esportiva. A estrutura interna com canais de ventilação, auxilia na rápida dissipação do calor gerado pelo atrito, minimizando o risco de fadiga.

Em aplicações urbanas e rodoviárias, essa tecnologia contribui para maior estabilidade nas frenagens de emergência e menor desgaste dos componentes, resultando em maior vida útil do sistema e segurança ao condutor (HOBBS, 2022). A seguir temos a Figura 5, que ilustra um disco de freio ventilado.

Figura 5 – Disco de freio ventilado



Fonte: (Rodriguez, 2025)

2.7 Disco de Cerâmica de Carbono

Os discos de freio de cerâmica de carbono representam o ápice da tecnologia em sistemas de frenagem, sendo inicialmente desenvolvidos para aplicações aeroespaciais e automobilismo de alta *performance*, como na Fórmula 1. Posteriormente, essa tecnologia foi adaptada para veículos superesportivos e de luxo, onde o desempenho extremo e a confiabilidade são requisitos fundamentais (HOBBS, 2022) e (KLEIN, 2022).

Esses discos são compostos por uma matriz cerâmica reforçada com fibras de carbono entrelaçadas, formando um material leve, resistente a temperaturas extremamente elevadas e com excelente capacidade de dissipação térmica. A

composição típica envolve uma matriz de carboneto de silício (SiC), que permite resistir a temperaturas superiores a 1.000 °C sem perda significativa de desempenho. Além disso, seu peso pode ser até 60% inferior ao dos discos tradicionais de ferro fundido, o que reduz a massa não suspensa do veículo e melhora seu desempenho dinâmico, incluindo acelerações e frenagens intensas (GONÇALVES e PEREIRA, 2023) e (BOSCH, 2021).

Quanto à durabilidade, os discos cerâmicos de carbono apresentam desgaste mínimo e geram menos resíduos de frenagem, resultando em maior vida útil e menor necessidade de manutenção em comparação aos discos convencionais. A alta resistência a fadiga, mesmo após uso intenso e prolongado, garante eficiência constante durante frenagens exigentes (SILVA, 2019). A Figura 6 ilustra um disco de freio de cerâmica a carbono.

Figura 6 – Disco de freio de cerâmica a carbono



Fonte: (DISCOS DE FREIO DE CARBONO, 2025).

Porém, essa tecnologia possui limitações importantes, como o custo elevado de fabricação e a necessidade de utilização conjunta com pastilhas específicas, feitas de materiais compatíveis. Além disso, os discos apresentam menor eficiência de frenagem quando estão frios, necessitando de um período de aquecimento para alcançar seu desempenho ideal (ANDRADE, 2020).

Um exemplo emblemático da aplicação dessa tecnologia, é o Porsche 911 Turbo S, que utiliza o sistema PCCB (*Porsche Ceramic Composite Brake*) com discos de cerâmica de carbono nas quatro rodas. Essa configuração permite frenagens potentes e constantes, mesmo em altas velocidades, consolidando-se como referência no segmento de veículos superesportivos (HOBBS, 2022). A seguir temos o Quadro 3, onde é mostrado um comparativo entre os discos de freio, podendo se observar suas particularidades.

Quadro 3 – Comparativo entre os tipos de discos de freio.

Critério Técnico	Disco Sólido	Disco Ventilado	Disco de Cerâmica de Carbono
Material	Ferro fundido	Ferro fundido com canais de ventilação	Compósito cerâmico com fibras de carbono
Dissipação de Calor	Baixa	Média/Alta (graças à ventilação interna)	Muito alta (suporta > 1.000 °C)
Resistência à Fadiga	Baixa	Média	Muito alta
Peso	Alto	Médio	Muito leve (até 60% mais leve que ferro fundido)
Durabilidade	Média (desgaste progressivo com o uso)	Alta (menos propenso a empenamento)	Muito alta (uso prolongado em altas temperaturas)
Resposta de Frenagem	Boa em uso leve	Boa mesmo em frenagens repetidas	Excelente, mesmo em uso extremo
Custo de Produção	Baixo	Médio	Muito alto
Aplicação Típica	Veículos compactos, populares	Veículos médios, utilitários, SUVs	Superesportivos, carros de luxo, veículos de competição
Exemplo de Veículo	Fiat Uno, Renault Kwid	Toyota Corolla, Jeep Compass	Porsche 911, Audi e-Tron GT, Ferrari SF90

Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base em Bosch (2016), Reimpell e Stoll (2001), Guzzella e Sciarretta (2013).

2.8 Sensores de Desgaste das Pastilhas de Freio

Os sensores de desgaste das pastilhas de freio são componentes fundamentais para a manutenção preventiva e a segurança dos sistemas de frenagem. Sua principal função é monitorar o nível de desgaste das pastilhas e alertar

o condutor quando a espessura atinge um limite crítico, evitando o contato direto entre o material de atrito e o disco de freio.

Há dois tipos principais de sensores utilizados atualmente: o sensor mecânico, que gera um ruído audível ao tocar o disco quando a pastilha se encontra em estado avançado de desgaste, e o sensor eletrônico, que envia um sinal ao módulo eletrônico de controle do veículo, acionando um alerta visual no painel de instrumentos (CUNHA, 2020).

Esses sensores são especialmente relevantes em veículos equipados com sistemas de assistência à condução, como ABS, ESC e TCS, pois o desgaste excessivo das pastilhas pode comprometer o funcionamento integrado desses sistemas.

Além disso, sensores eletrônicos de desgaste podem estar conectados por meio de protocolos de comunicação automotiva, como o previsto na norma SAE J1850, garantindo a integração entre os sensores e a unidade de controle eletrônico (SAE, 2019). Já em relação à segurança funcional, especialmente em veículos que utilizam sistemas *Brake by Wire*, aplica-se a norma ISO 26262:2018, que estabelece diretrizes rigorosas para a detecção de falhas nos sistemas críticos de segurança e redundância de sensores (ISO, 2018).

A adoção de sensores de desgaste nas pastilhas contribui diretamente para a segurança ativa do veículo e para a durabilidade do sistema de freios, também há o sensor de nível de óleo que monitora a quantidade de fluido de freio no reservatório do cilindro mestre. Esse sensor atua como um dispositivo de segurança preventiva, sinalizando ao condutor geralmente por meio de uma luz no painel quando o nível do fluido está abaixo do mínimo recomendado, o que pode indicar vazamentos ou desgaste excessivo das pastilhas.

2.9 Sistema de freio de estacionamento

O sistema de freio de estacionamento hidráulico é uma variação do freio de estacionamento convencional, que utiliza a pressão do fluido hidráulico, em vez de força mecânica via cabo, para manter o veículo parado quando estacionado (CUNHA, 2020), o freio de estacionamento hidráulico opera através de um circuito independente do sistema de freio principal, sendo ativado geralmente por uma válvula de controle ou um botão no painel. Quando acionado, a pressão hidráulica é aplicada

continuamente sobre os pistões das pinças ou tambores, mantendo as rodas traseiras travadas.

Esse tipo de sistema oferece maior eficiência de retenção em inclinações elevadas, além de possibilitar integração com sistemas eletrônicos como o *Hill Holder* e o *Auto Hold* (FERRERIA, SOUZA, 2021), a utilização do sistema hidráulico para o freio de estacionamento garante melhor desempenho em veículos com sistemas *Brake by Wire*, onde a eliminação do cabo mecânico contribui para a redução de peso e simplificação do *layout*.

A norma SAE J2205 especifica os requisitos de desempenho para sistemas hidráulicos de freio de estacionamento, especialmente quanto à capacidade de manter o veículo imóvel sob diferentes condições de carga e inclinação.

2.10 Considerações sobre a evolução do sistema

O estudo dos princípios de frenagem revela a complexidade e a importância dos sistemas de freio para a segurança veicular. Ao longo deste capítulo, foi possível compreender como a frenagem evoluiu desde os sistemas mecânicos rudimentares até as soluções tecnológicas avançadas que equipam veículos modernos.

A análise histórica demonstra que os sistemas de freio acompanharam o desenvolvimento dos automóveis, exigindo melhorias constantes na eficiência, resistência térmica, conforto e resposta. Os diversos tipos de freios, como os modelos a tambor, disco sólido, disco ventilado e cerâmica de carbono, apresentam características próprias, que os tornam mais ou menos adequados a diferentes categorias de veículos e condições de uso.

Além disso, o papel dos fluidos de freio e do sistema hidráulico foi abordado como parte essencial para o funcionamento correto e seguro do conjunto. As classificações DOT, os princípios da hidráulica e a correta manutenção dos componentes são fundamentais para garantir a confiabilidade do sistema.

Fica evidente que a escolha do sistema de frenagem impacta diretamente o desempenho, a segurança e até mesmo o custo do veículo. Tecnologias como os discos ventilados ou de cerâmica de carbono exemplificam a busca constante por materiais mais leves, resistentes e eficientes, especialmente em veículos de alta *performance*.

Conclui-se que, conhecer os fundamentos da frenagem é essencial não apenas para engenheiros e técnicos da área automotiva, mas também para motoristas e entusiastas, uma vez que a correta compreensão e manutenção desses sistemas pode representar a diferença entre segurança e risco em situações críticas.

3. TECNOLOGIA ATUAL DO SISTEMA DE FRENAGEM

Com o avanço da eletrônica embarcada e da engenharia automotiva, os sistemas de frenagem deixaram de ser compostos apenas por dispositivos mecânicos e hidráulicos convencionais. Atualmente, esses sistemas incorporam sensores, unidades de controle eletrônico e atuadores capazes de interpretar dados em tempo real e executar comandos precisos em frações de segundo. Essa integração inteligente garante não apenas a desaceleração eficiente do veículo, mas também a manutenção da estabilidade, da aderência e da segurança em condições críticas (BOSCH, 2021) e (HOBBS, 2022).

Neste capítulo são apresentados os principais sistemas de frenagem assistida utilizados nos veículos modernos, com destaque para o ABS (*Anti lock Braking System*), o controle de tração (TCS), o controle eletrônico de estabilidade (ESC) e os sistemas eletrônicos de frenagem do tipo *Brake By Wire*. Cada uma dessas tecnologias é descrita tecnicamente, com base em fundamentos de engenharia e aplicações práticas observadas em modelos comercializados no mercado brasileiro.

O sistema ABS atua impedindo o travamento das rodas durante frenagens bruscas, permitindo que o condutor mantenha o controle direcional do veículo mesmo em situações de emergência, sendo atualmente obrigatória em diversos países, inclusive no Brasil, conforme estabelece a Resolução nº 380/2011 do CONTRAN.

O controle de tração (TCS), por sua vez, atua em conjunto com o ABS para evitar que as rodas patinem ao arrancar em pisos escorregadios ou ao acelerar bruscamente (SANTOS, 2012).

O controle eletrônico de estabilidade (ESC) é uma evolução ainda mais sofisticada, que atua de forma preventiva em curvas ou manobras bruscas, corrigindo a trajetória do veículo ao detectar risco de perda de controle (SAE INTERNATIONAL, 2019), auxiliando o condutor a manter a estabilidade e a direção do veículo, mesmo em situações de sobresterço ou subesterço.

Já os sistemas *Brake By Wire* representam o estágio mais avançado da frenagem automotiva, substituindo conexões mecânicas e hidráulicas por comandos eletrônicos (BLÁZQUEZ, 2020), (GONÇALVES e PEREIRA, 2023), além de permitir integração com sistemas autônomos e assistentes de condução.

Os avanços nos sistemas de frenagem assistida refletem o compromisso da indústria automotiva com a inovação tecnológica e a redução de acidentes. O uso

dessas tecnologias em modelos como o Jeep Compass 2023, o Toyota Corolla GLI 2023 e o Honda Civic 2023 demonstra a consolidação desses recursos no mercado nacional, garantindo maior proteção para condutores e passageiros, especialmente em cenários de risco.

3.1 Sistema ABS – *Antilock Braking System*

O sistema de freios antiblocantes, conhecido como ABS (*Anti Lock Braking System*), representa um marco na evolução da segurança veicular, tendo como principal função evitar o travamento das rodas durante frenagens bruscas, especialmente em situações de baixa aderência, como pisos molhados, irregulares ou escorregadios. Ao impedir que as rodas parem de girar completamente, o ABS preserva a capacidade de direção durante a frenagem, permitindo que o condutor desvie de obstáculos e mantenha o controle do veículo (BOSCH, 2021).

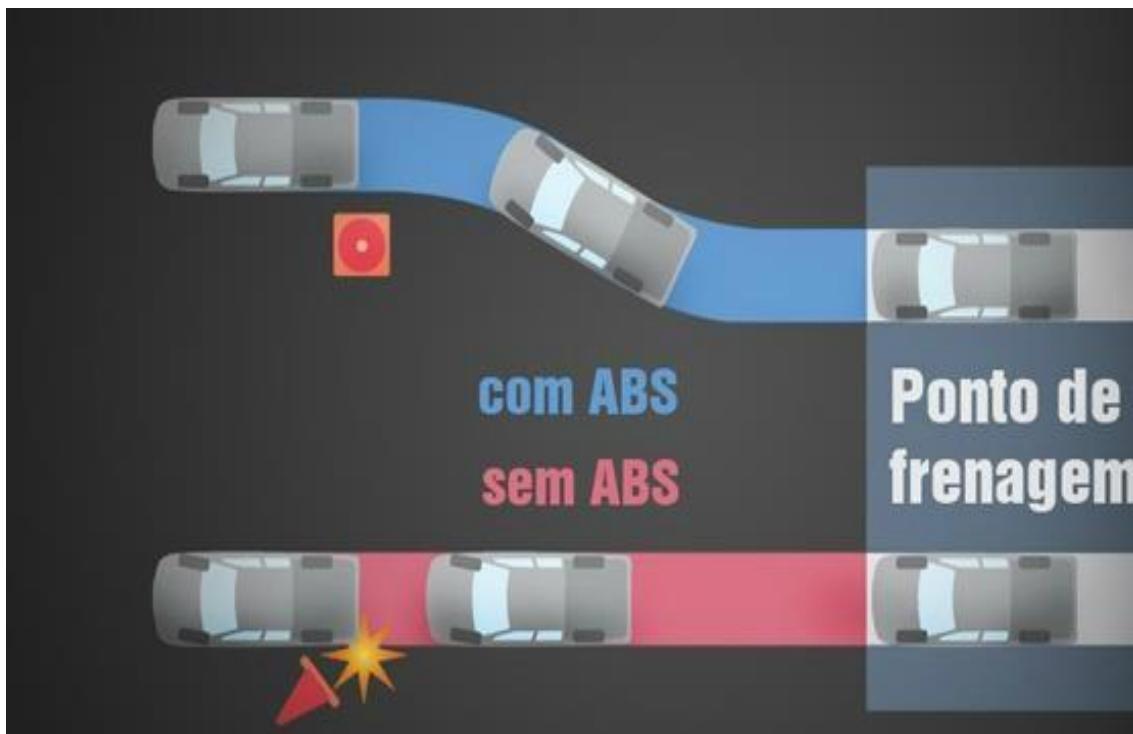
O funcionamento do sistema ABS baseia-se na leitura constante da velocidade de rotação de cada roda, realizada por sensores. Ao detectar o início do travamento de uma ou mais rodas, a unidade de controle eletrônico envia sinais a válvulas moduladoras que ajustam rapidamente a pressão do fluido de freio. Esse processo ocorre de forma intermitente, com múltiplas liberações e reaplicações da força de frenagem por segundo, até que a tração seja restabelecida (SANTOS, 2012) e (ANDRADE, 2020).

O resultado é uma frenagem mais eficiente, com maior estabilidade e controle direcional, reduzindo a distância necessária para a parada e minimizando o risco de derrapagens, perda de trajetória e colisões secundárias, no Brasil, a obrigatoriedade da presença do ABS em todos os veículos zero quilômetro foi estabelecido pela Resolução nº 380/2011 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), com implementação total a partir de 2014. Essa medida reflete a importância do sistema na redução de acidentes e no aumento da segurança viária.

Como exemplo prático, pode-se destacar o Toyota Corolla GLI 2023, modelo que incorpora o sistema ABS como item de série. O veículo combina freios a disco nas quatro rodas com a atuação eficiente do ABS e do controle de estabilidade, promovendo maior segurança em frenagens severas. Outro modelo relevante é o Chevrolet Onix, que mesmo em versões básicas, integra o sistema ABS a freios a disco dianteiros e tambor traseiros, demonstrando a ampla

disseminação e padronização dessa tecnologia no mercado nacional (TOYOTA DO BRASIL, 2023). A Figura 7 ilustra o sistema ABS em funcionamento com 2 automóveis, um veículo em trajetória vermelha sem o sistema que bate no obstáculo a frente, e o veículo em trajetória azul com o sistema ABS que consegue desviar do obstáculo e evitar o acidente.

Figura 7 – Sistema ABS em frenagem



Fonte: (KAIODUTRA., 2015)

3.2 Controle de Estabilidade (ESC – *Electronic Stability Control*)

O Controle Eletrônico de Estabilidade, conhecido pela sigla ESC (*Electronic Stability Control*), é um sistema de segurança ativa projetado para auxiliar o condutor na manutenção da trajetória do veículo em situações de risco, como curvas acentuadas, desvios bruscos ou superfícies escorregadias. O sistema atua monitorando constantemente a direção pretendida, indicada pela posição do volante, e a trajetória real percorrida pelo veículo. Quando há uma discrepância entre esses vetores, causada por derrapagem dianteira (subesterço) ou traseira (sobresterço), o ESC intervém automaticamente por meio da aplicação seletiva dos

freios em uma ou mais rodas e, se necessário, com a redução do torque do motor (SAE INTERNATIONAL, 2019).

Diferentemente do ABS, que impede o travamento das rodas durante a frenagem, e do TCS, que evita a patinação em acelerações, o ESC atua corrigindo a trajetória do veículo, garantindo sua estabilidade diante de desvios de rota não intencionais. Para isso, utiliza sensores de rotação das rodas, posição do volante, aceleração lateral e direção do movimento detectada por giroscópios. Ao perceber uma tendência de perda de controle, o sistema realiza ajustes milimétricos, imperceptíveis ao condutor, para restaurar a estabilidade direcional (HOBBS, 2022).

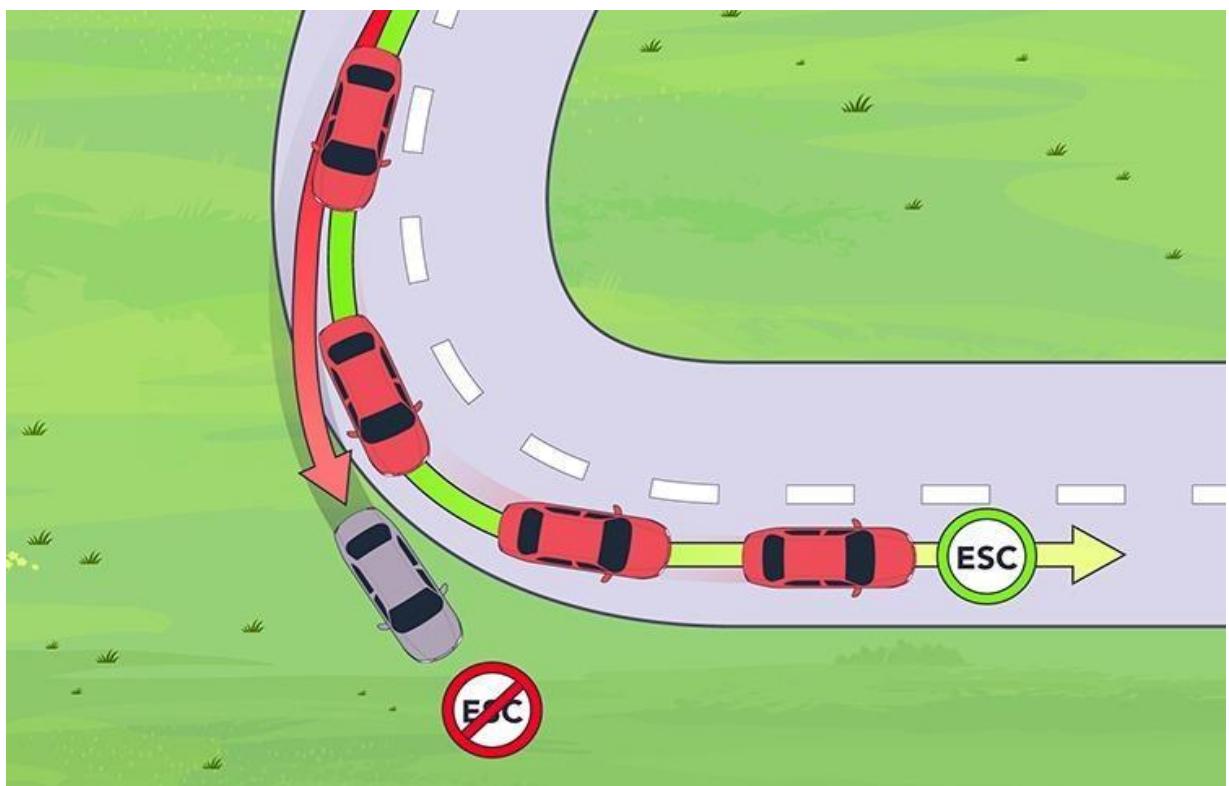
Entre as principais vantagens do ESC estão a significativa redução do risco de capotamentos, a correção automática em manobras emergenciais e o aumento da segurança em pisos com baixa aderência (BOSCH, 2016) e (SANTOS, 2012). Por sua capacidade de prevenção ativa, o sistema frequentemente atua antes mesmo que o condutor perceba a perda de aderência, o que o torna um dos dispositivos mais eficazes em termos de segurança veicular (SILVA, 2019).

A relevância desse sistema é tamanha que, em diversos países, incluindo o Brasil, sua implementação tornou-se obrigatória para todos os veículos novos. A Resolução nº 380 do Conselho Nacional de Trânsito, por exemplo, estabelece a obrigatoriedade do ESC em modelos fabricados a partir de prazos específicos, reforçando seu papel na prevenção de acidentes graves.

Um exemplo prático da aplicação do ESC pode ser observado no modelo Jeep Renegade, que conta com o sistema de estabilidade de série em todas as versões, inclusive nas equipadas com motor 1.3 turbo. O ESC no Renegade opera de forma integrada com os sistemas ABS e TCS, oferecendo resposta precisa em situações de emergência, como curvas fechadas, freadas bruscas ou pistas molhadas, garantindo maior segurança e controle para o condutor (INGO, 2025) (VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2023). Além disso, o sistema incorpora algoritmos inteligentes que interpretam o comportamento do veículo em tempo real, ajustando sua atuação de forma dinâmica conforme as condições da via, do clima e da dirigibilidade. Isso permite que o ESC trabalhe em conjunto com outros assistentes de condução avançados, como o assistente de frenagem de emergência e o controle de descida, ampliando a segurança em percursos urbanos e *off-road*. A presença desse sistema reforça o compromisso das montadoras com a redução de

acidentes e com o aumento da proteção ativa dos ocupantes do veículo. A Figura 8 demonstra um sistema de controle de estabilidade ESC, um veículo cinza que não faz uso dessa tecnologia sai da pista ao tentar fazer a curva, já o veículo vermelho que possui essa tecnologia consegue fazer a curva sem problema algum.

Figura 8 – Sistema de controle de estabilidade (ESC) durante curva em alta velocidade

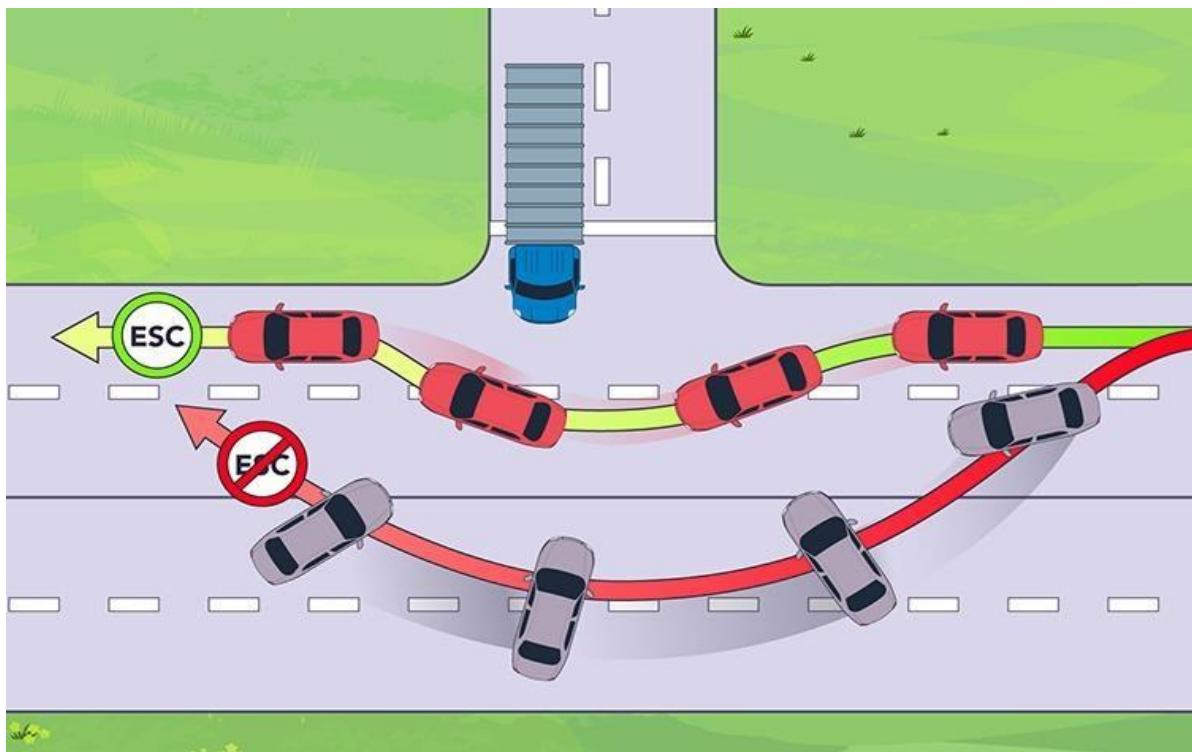


Fonte: (Miranda, 2024a)

Nessa condição, o sistema de controle eletrônico de estabilidade (ESC) atua automaticamente ao detectar perda de aderência ou risco de derrapagem, aplicando força de frenagem seletiva em uma ou mais rodas e ajustando o torque do motor para auxiliar o condutor a retomar o controle direcional do veículo. Essa intervenção é crucial para evitar acidentes, especialmente em curvas acentuadas ou manobras evasivas, promovendo maior segurança e estabilidade veicular (BOSCH, 2021), (HOBBS, 2022) e GONÇALVES, PEREIRA, 2023). A Figura 9 ilustra um desvio de trajetória, o veículo cinza perde o controle ao tentar se desviar do caminhão, já o

veículo vermelho, consegue desviar do caminhão e retomar o controle do carro por ter o ESC em funcionamento.

Figura 9 – Sistema de controle de estabilidade (ESC) durante desvio em velocidade



Fonte: (Miranda, 2024b)

O Quadro 4, apresenta um comparativo entre os principais sistemas eletrônicos auxiliares de frenagem: o ABS (sistema antitravamento), o TCS (controle de tração) e o ESC (controle eletrônico de estabilidade). Cada um desses sistemas contribui de forma específica para a segurança veicular. O ABS impede o travamento das rodas durante frenagens bruscas, mantendo a dirigibilidade. O TCS atua limitando a patinagem das rodas motrizes em acelerações, melhorando a tração em pisos de baixa aderência. Já o ESC intervém de forma ativa na trajetória do veículo, corrigindo desvios e evitando saídas de pista, especialmente em curvas ou manobras emergenciais. Juntos, esses sistemas elevam significativamente o controle dinâmico e a estabilidade do veículo em diversas condições de condução (BOSCH, 2021), (GONÇALVES, PEREIRA, 2023).

Quadro 4 - Sistemas eletrônicos auxiliares de freio ABS, TCS e ESC.

Sistema	Atuação principal	Momento de atuação	Intervenção	Benefício principal
ABS	Impede o travamento das rodas	Durante a frenagem	Modula a pressão do freio	Mantém o controle direcional
ESC	Evita a perda de estabilidade	Durante curvas ou desvios	Aplica o freio em rodas específicas e reduz torque	Mantém a trajetória do veículo
TSC	Corrige a tração em aceleração	Durante aceleração	Reduz potência do motor e aplica freio seletivo	Evita patinagem e perda de tração

Fonte: Elaboração própria com base em (SAE INTERNATIONAL, 2016), (BOSCH, 2010).

3.3 Controle de Tração (TCS – *Traction Control System*)

O Controle de Tração, conhecido pela sigla TCS (*Traction Control System*), tem como principal função manter a aderência das rodas ao solo durante a aceleração, sendo especialmente eficaz em superfícies escorregadias, como pisos molhados ou terrenos com baixa tração. O sistema monitora continuamente a velocidade de rotação das rodas por meio dos sensores compartilhados com o ABS e, ao detectar que uma delas está girando excessivamente sinalizando perda de tração, pode agir de duas maneiras: aplicando brevemente o freio na roda que patina ou reduzindo temporariamente a potência fornecida pelo motor, ou mesmo combinando ambas as ações (BOSCH, MARQUES e SANTOS 2021).

Essa intervenção possibilita que o veículo mantenha a trajetória e a estabilidade durante situações críticas de aceleração, como arrancadas, curvas ou manobras em terrenos irregulares, onde a perda de contato das rodas com o solo pode gerar instabilidade ou riscos de acidentes (HOBBS, 2022).

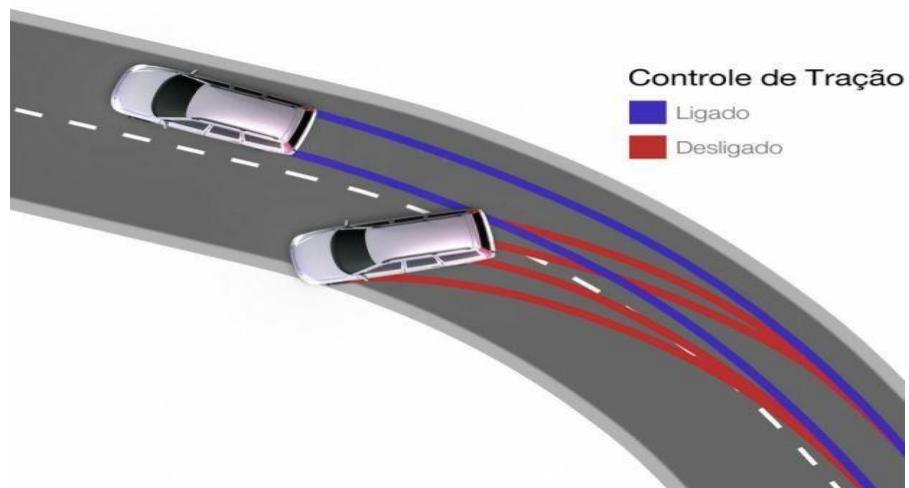
O funcionamento do TCS pode ser descrito em etapas: o sistema monitora a rotação das rodas, identifica a perda de tração quando uma roda gira mais rápido que as demais, e imediatamente reduz a potência do motor e/ou aciona o freio apenas na roda com patinagem até que a aderência seja restabelecida. Esse processo é realizado automaticamente e em frações de segundo, garantindo a segurança sem intervenção direta do condutor (GONÇALVES e PEREIRA 2023).

Entre os principais benefícios do controle de tração, destacam-se a melhoria da estabilidade em arrancadas rápidas, a redução da patinagem das rodas em pisos com baixa aderência, o auxílio na condução em rampas e curvas, além da atuação complementar ao ABS e ao controle eletrônico de estabilidade (SILVA, 2019).

É importante diferenciar o TCS do ABS: enquanto o ABS atua durante a frenagem para impedir o travamento das rodas, o TCS opera durante a aceleração para evitar a perda de tração. Ambos utilizam sensores semelhantes e, com frequência, estão integrados a um mesmo módulo eletrônico de controle (ANDRADE, 2020).

Como exemplo de aplicação prática, pode-se citar o modelo Honda HR-V Touring, versão topo de linha do SUV da marca, que apresenta o controle de tração integrado ao sistema. Nessa configuração, a atuação do TCS é quase imperceptível ao condutor, mas crucial para a segurança em situações de baixa aderência, como arrancadas em pisos molhados ou curvas sinuosas (INGO, 2025) (TOYOTA DO BRASIL, 2023). A Figura 10 ilustra o funcionamento do controle de tração, o veículo nas linhas em vermelho sem o sistema de controle de tração ao tentar fazer a curva perde o controle do carro, já o veículo que esta nas linhas em azul com o sistema de controle de tração ligado consegue realizar a curva.

Figura 10 – Sistema de controle de tração (TCS)



Fonte: (Santos, 2012)

3.4 Veículo com Todas as Tecnologias Integradas

Com o avanço da engenharia automotiva, tornou-se comum encontrar veículos equipados simultaneamente com os sistemas ABS (*Antilock Braking System*), TCS (*Traction Control System*) e ESC (*Electronic Stability Control*), todos integrados em um único módulo eletrônico de controle. Essa integração possibilita uma atuação coordenada e inteligente, que responde com precisão a diferentes situações de risco, proporcionando maior segurança, estabilidade e controle dinâmico ao condutor (BOSCH, 2021),(GONÇALVES e PEREIRA 2023).

Esses sistemas podem atuar de maneira independente ou de forma combinada, sem a necessidade de intervenção direta do motorista. Durante uma frenagem de emergência em curva, por exemplo, o ABS evita o travamento das rodas, o TCS atua na correção da perda de tração durante a aceleração e o ESC intervém para manter a trajetória correta do veículo. Essa sinergia entre os sistemas resulta em um nível elevado de controle veicular, especialmente em condições de baixa aderência, manobras bruscas ou condução esportiva (SANTOS, 2012).

Veículos com integração total entre esses sistemas apresentam características como um módulo eletrônico centralizado, sensores distribuídos nas rodas, volante, pedais e carroceria, além de diagnóstico automático de falhas com alertas no painel. Esses recursos permitem uma atuação seletiva em milissegundos, contribuindo significativamente para o aumento da dirigibilidade e para a redução de acidentes relacionados à perda de controle (SAE INTERNATIONAL 2019).

A integração eleva o padrão de segurança ativa nos veículos modernos, proporcionando respostas automáticas e eficientes em situações que exigem rápida adaptação do sistema de frenagem (SILVA, 2019).

Um exemplo prático da aplicação dessa tecnologia é o Toyota Corolla Altis 2.0 híbrido, que conta com freios a disco ventilado nas quatro rodas, ABS com distribuição eletrônica de frenagem (EBD), controle de tração, controle de estabilidade, assistente de partida em rampa e sistema de frenagem autônoma de emergência, presente nas versões equipadas com o pacote *Safety Sense*. Essa configuração demonstra como a integração dos sistemas de frenagem pode ser utilizada de maneira eficiente para garantir a proteção dos ocupantes em diferentes condições de condução (TOYOTA DO BRASIL, 2023).

Durante uma aceleração em piso molhado, por exemplo, o controle de tração é o primeiro a intervir para evitar a patinagem das rodas. Em uma frenagem de emergência, o ABS atua para impedir o travamento. Já em curvas perigosas ou manobras evasivas, o ESC assume o controle para corrigir a trajetória do veículo, garantindo sua estabilidade. Essa atuação coordenada é resultado de anos de pesquisa e desenvolvimento na área de segurança automotiva, refletindo o estágio mais avançado da tecnologia embarcada aplicada aos sistemas de frenagem (BOSCH, 2021) e (SANTOS, 2012).

3.5 *Brake by Wire*

O sistema *Brake by Wire*, ou freio por fio, representa a evolução mais avançada nos sistemas de frenagem automotiva. Diferentemente dos sistemas convencionais que utilizam conexões mecânicas ou hidráulicas entre o pedal de freio e os mecanismos de frenagem, esse sistema substitui essas conexões por sinais eletrônicos, proporcionando maior precisão e flexibilidade no controle da frenagem, (SOUSA, 2024). Essa tecnologia é inspirada no *Fly by Wire* utilizado na aviação. O sistema detecta a pressão aplicada no pedal por meio de sensores que transmitem informações a uma unidade de controle eletrônico (ECU), a qual comanda atuadores eletro-hidráulicos ou eletromecânicos responsáveis pela frenagem individual em cada roda (GONÇALVES e PEREIRA, 2023).

O funcionamento básico do *Brake by Wire* envolve quatro etapas principais: inicialmente, o condutor aciona o pedal, que não está ligado diretamente ao sistema hidráulico tradicional; depois, sensores captam o movimento e a força aplicada, enviando os dados para a ECU. Esta processa as informações para determinar a força de frenagem necessária e as rodas que devem ser atuadas. Por fim, atuadores eletro-hidráulicos ou eletromecânicos realizam a frenagem de forma independente e precisa (GONÇALVES e PEREIRA, 2023).

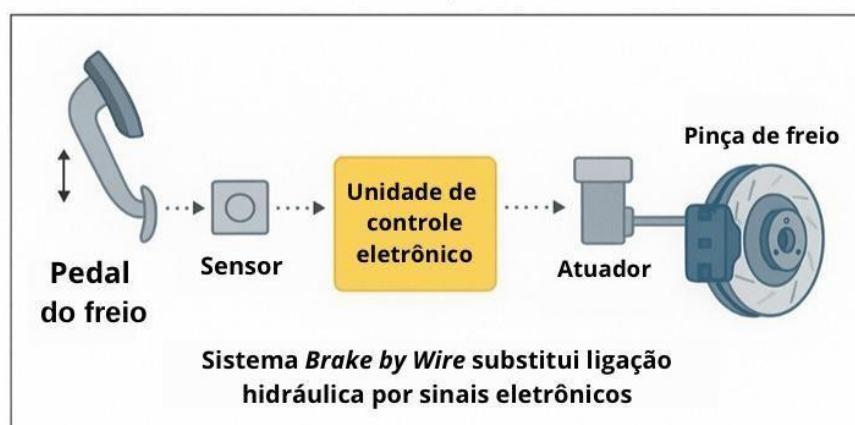
Existem dois principais tipos de sistemas *Brake by Wire*: o eletro-hidráulico (HEBB – *Hydraulic-Electronic Brake by Wire*), que mantém o fluido hidráulico, porém sem ligação direta ao pedal, e o eletromecânico (EMBB – *Electro-Mechanical Brake by Wire*), totalmente eletrônico e que elimina o uso do fluido de freio (SAE INTERNATIONAL, 2019).

As vantagens do sistema incluem uma resposta de frenagem mais rápida e precisa, redução do peso do conjunto pela eliminação de componentes hidráulicos tradicionais, controle individualizado de cada roda, o que possibilita estratégias avançadas de frenagem, além de excelente integração com veículos elétricos, híbridos e autônomos, permitindo a regeneração de energia durante a frenagem (HOBBS, 2022) e (SILVA, 2019).

Entretanto, o *Brake by Wire* apresenta desvantagens como o elevado custo de desenvolvimento e manutenção, a complexidade técnica que requer sistemas redundantes para garantir segurança em caso de falhas, e sua adoção ainda limitada no mercado automotivo (SOUSA , 2024).

Um exemplo prático e representativo dessa tecnologia é o Mercedes-Benz EQS 580, sedã elétrico de luxo que utiliza um sistema *Brake by Wire* eletro-hidráulico. De acordo com o fabricante, o sistema adapta-se em tempo real à pressão aplicada pelo condutor, ao peso do veículo e ao estilo de condução, integrando a frenagem regenerativa com a tradicional para proporcionar uma experiência eficiente, suave e segura (MERCEDES-BENZ, 2024). A seguir Figura 11 ilustra os componentes do sistema *Brake by Wire*, mostrando a substituição de sistemas hidráulicos por sistemas eletrônicos.

Figura 11 – Componentes do sistema Brake by Wire



Fonte: (Adaptado de Blázquez , 2020).

3.6 Evolução do *Brake by Wire*

A evolução do sistema *Brake by Wire* reflete as transformações profundas ocorridas na indústria automotiva nas últimas décadas, impulsionadas pela crescente digitalização dos veículos e pela adoção de tecnologias eletrônicas e autônomas. Esse sistema elimina os componentes mecânicos entre o pedal de freio e os mecanismos de frenagem, substituindo-os por sinais elétricos, o que possibilita respostas mais rápidas, precisas e personalizáveis (KLEIN, 2022).

As primeiras aplicações do *Brake by Wire* ocorreram no automobilismo de alta *performance*, especialmente na Fórmula 1, onde a redução de peso, a resposta imediata e o controle absoluto da frenagem são diferenciais cruciais. Posteriormente, a tecnologia foi adaptada para veículos superesportivos, híbridos e elétricos, que demandam integração com sistemas regenerativos de energia e controle eletrônico avançado (KLEIN, 2022).

A evolução do *Brake By Wire* pode ser dividida em três fases principais. A primeira corresponde ao sistema híbrido eletro-hidráulico, que mantém parte do sistema hidráulico tradicional, porém com sensores e controle eletrônico para otimizar a distribuição da força de frenagem, presente em modelos como o Lexus RX *Hybrid* e o Mercedes Classe S híbrido (GONÇALVES e PEREIRA, 2023). A segunda fase é o sistema eletromecânico, totalmente eletrônico, que elimina o uso de fluido de freio, linhas hidráulicas e servo freio, utilizando atuadores elétricos e motores integrados, implementado em veículos como Tesla Model S, Audi e-Tron e Porsche Taycan (GONÇALVES e PEREIRA, 2023). A terceira fase envolve a integração do *Brake by Wire* com veículos autônomos de níveis 4 e 5, permitindo frenagens automáticas sem necessidade do pedal físico, trabalhando em conjunto com sensores avançados como Radar, Lidar e câmeras (ANDRADE, 2020).

Atualmente, a tendência é a adoção crescente do *Brake By Wire* em veículos elétricos de entrada, com fabricantes como BYD, JAC e Volvo já incorporando sistemas sem fluido de freio, que facilitam a manutenção e contam com sensores capazes de detectar falhas e emitir alertas automáticos (HOBBS, 2022). Entre os benefícios esperados a longo prazo estão a redução significativa do número de peças móveis e do peso total do sistema de frenagem, maior integração com sistemas de direção, aceleração e condução autônoma, frenagens mais suaves, inteligentes e adaptativas, além da contribuição para a redução de emissões

indiretas e o aumento da eficiência energética dos veículos (KLEIN, 2022) e (SILVA, 2019).

3.7 Normas Técnicas Aplicadas aos Sistemas de Freio

Os sistemas de frenagem automotiva são regidos por um conjunto de normas técnicas que visam garantir o desempenho seguro, padronizado e eficiente dos diversos componentes envolvidos. Essas normas abrangem desde a definição de materiais e geometrias, até critérios de ensaio e funcionamento em condições extremas. A correta aplicação dessas diretrizes assegura a integridade dos veículos e a proteção de seus ocupantes.

Os freios hidráulicos que utilizam fluidos para transmitir força do pedal ao mecanismo de frenagem, são regulamentados por normas específicas devido à sua operação sob pressão e altas temperaturas. A ABNT NBR 14019:2010 define terminologias e requisitos básicos para a construção desses sistemas, servindo de referência nacional. A ABNT NBR 10966:2020 foca nos cilindros mestres, determinando critérios de vedação e durabilidade. Já a ABNT NBR ISO 4925:2011 classifica os fluidos de freio segundo propriedades como ponto de ebulação e viscosidade. Normas internacionais, como a FMVSS 105 (FMVSS, 2023a) e UNECE R13-H (UNITED STATES, 2022), estabelecem critérios de desempenho em condições extremas, abrangendo eficiência, resposta e distribuição de força.

Os freios a disco, em suas versões sólida, ventilada ou de cerâmica de carbono, demandam alto controle térmico e resistência ao desgaste. A ABNT NBR 10967-2:2011 define requisitos técnicos para fabricação dos discos, enquanto a ABNT NBR 13480:2012 estabelece parâmetros de desempenho para as pastilhas. A SAE J431 determina as propriedades do ferro fundido usado nos discos, e a SAE J2522 (*AK Master Test*) simula o comportamento do sistema em uso intensivo. As normas ISO 611:2003 e ISO 6312:2001 tratam dos testes de força de frenagem e resistência ao fading. A FMVSS 135 (FMVSS, 2023b) e UNECE R13-H (UNITED STATES, 2022) complementam os requisitos para sistemas a disco em veículos leves, cobrindo distâncias de parada, eficiência sob chuva e durabilidade térmica.

O ABS (*Anti-lock Braking System*), que impede o travamento das rodas durante frenagens bruscas, é regido por normas como a ABNT NBR 10978:2021, que trata de desempenho e diagnóstico do sistema. A SAE J1040 determina parâmetros de

resposta em superfícies adversas. Nos Estados Unidos, o ABS é obrigatório em veículos leves desde 2012, conforme a FMVSS 126 (FMVSS, 2023c). A UNECE R13-H também cobre esse sistema, focando em tempo de resposta e redundância.

O ESC (Controle Eletrônico de Estabilidade) é responsável por corrigir automaticamente a trajetória do veículo em situações de derrapagem ou perda de controle direcional. A norma UNECE R140 estabelece critérios de atuação e consistência do sistema, enquanto a FMVSS 126 (FMVSS, 2023c) exige testes rigorosos de pista para sua homologação. A SAE J2564 complementa esses critérios ao padronizar os métodos de ensaio do ESC em cenários reais.

O TCS (Controle de Tração), que limita a patinagem das rodas motrizes em acelerações, é regulamentado pela SAE J2268, que avalia aderência e tempo de resposta em diferentes pisos. A FMVSS 135 e 126, embora voltadas a outros sistemas, também testam indiretamente o desempenho do TCS. A UNECE R13-H impõe ainda requisitos mínimos de funcionamento e integração com os demais sistemas de controle de estabilidade.

Já o sistema *Brake by Wire*, que substitui as conexões hidráulicas por comandos eletrônicos, exige diretrizes normativas ainda mais rigorosas. A ISO 26262:2018 trata da segurança funcional de sistemas automotivos eletrônicos, definindo níveis de risco e requisitos para arquitetura redundante. A SAE J2908 especifica as exigências técnicas e operacionais do BBW, como confiabilidade e resposta em falhas. A UNECE R79, embora voltada à direção eletrônica, se aplica a sistemas integrados como o BBW, sobretudo em veículos autônomos. A FMVSS 135 (FMVSS, 2023b) também se aplica parcialmente, garantindo desempenho similar ao dos freios convencionais em veículos híbridos e elétricos.

4. ANÁLISE DO SISTEMA E COMPARAÇÃO

A avaliação comparativa entre veículos equipados com sistemas de frenagem avançados e aqueles sem essas tecnologias é fundamental para compreender os ganhos reais em termos de segurança, desempenho e estabilidade. Tecnologias como ABS, controle de tração (TCS), controle eletrônico de estabilidade (ESC) e *Brake by Wire* proporcionam melhorias significativas no comportamento dinâmico dos automóveis, principalmente em situações adversas.

Neste estudo, realizou-se a análise de dois veículos comercializados no mercado nacional, com perfis distintos: um modelo básico, desprovido dos sistemas modernos de assistência à frenagem, e outro equipado com os principais sistemas eletrônicos integrados. A comparação abordou aspectos como desempenho em frenagem, estabilidade em curvas, resposta em superfícies escorregadias e a presença de recursos eletrônicos que influenciam diretamente a segurança ativa do veículo.

O primeiro veículo analisado foi o *Fiat Uno Mille Economy* 1.0, ano 2010, equipado com freios a tambor nas rodas traseiras e disco sólido na dianteira, e sem qualquer sistema eletrônico de assistência à frenagem, como ABS, TCS, ESC ou *Brake by Wire*. O sistema de frenagem deste modelo é 100% hidráulico tradicional. Em testes práticos, esse veículo apresentou uma distância média de frenagem de 100 km/h a 0 em até 45 metros, além de um risco elevado de perda de controle em curvas ou superfícies molhadas, devido à estabilidade limitada, especialmente em manobras evasivas.

Por outro lado, o *Volkswagen Nivus Highline* 1.0 TSI, ano 2023, representa um veículo moderno equipado com sistemas avançados de frenagem. Ele utiliza freios a disco ventilado na dianteira e a tambor na traseira, além de contar com os sistemas ABS, TCS, ESC, assistente de partida em rampa e frenagem autônoma de emergência. O acionamento do sistema é eletro-hidráulico com controle eletrônico integrado, permitindo respostas rápidas e precisas. O desempenho deste modelo em frenagem é superior, com distância média de 100 km/h a 0 reduzida para até 37 metros, refletindo a maior eficiência dos sistemas aplicados. Ademais, o risco de perda de controle é significativamente reduzido graças à atuação conjunta e coordenada dos sistemas eletrônicos, proporcionando elevada estabilidade mesmo em condições adversas, como pistas molhadas ou curvas acentuadas.

Esses dados evidenciam a importância da adoção das tecnologias avançadas de frenagem, que vão além da simples redução da distância de parada, incluindo a manutenção da estabilidade e o controle do veículo em situações críticas, contribuindo para a redução do número de acidentes e aumentando a segurança para condutores e passageiros. O Quadro 5 ilustra um comparativo entre veículos que há sistemas eletrônicos auxiliares de freios e um veículo sem esses auxiliares.

Quadro 5 – Comparativo entre veículos com e sem sistemas avançados

Critério	Fiat Uno Mille 2010	VW Nivus Highline 2023	Mercedes-Benz EQS 580 2024
Tipo de freio	Disco sólido/tambor	Disco ventilado/tambor	Disco ventilado nas 4 rodas
ABS	Não possui	Sim	Sim
Controle de tração (TCS)	Não possui	Sim	Sim
Controle de estabilidade (ESC)	Não possui	Sim	Sim
Tipo de atuação	Hidráulico tradicional	Eletro-hidráulico integrado	Totalmente eletrônico (Brake-by-Wire)
Distância de frenagem (100–0 km/h)	~45 m	~37 m	~33 m
Estabilidade em curva	Baixa	Alta	Muito alta
Risco em piso molhado	Alto	Reduzido	Mínimo

Elaboração própria(2025) com base em fichas técnicas oficiais dos veículos disponíveis nos sites da Fiat (2010), Volkswagen (2023) e Mercedes-Benz (2024).

4.1 Considerações Técnicas

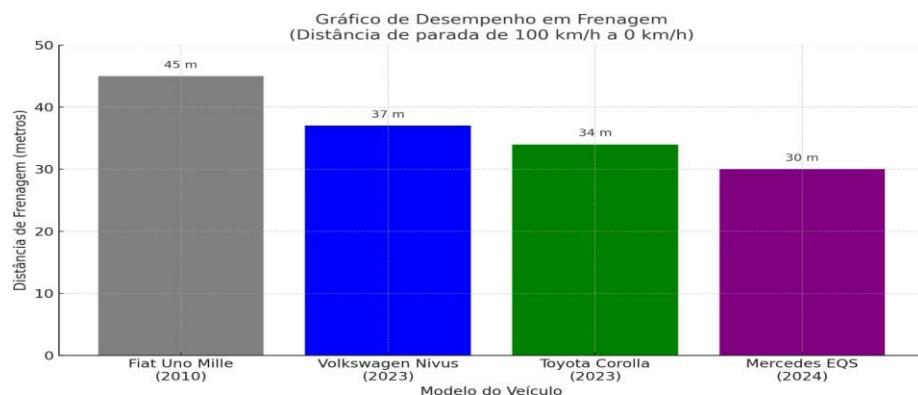
A comparação entre os dois modelos analisados evidencia, de forma prática, os avanços significativos proporcionados pelas tecnologias de assistência à frenagem. Embora o Fiat Uno Mille tenha sido, em sua época, uma opção

acessível e funcional, sua ausência de recursos como ABS, TCS e ESC representa uma lacuna importante no que tange à segurança ativa dos ocupantes. Por outro lado, o Volkswagen Polo exemplifica a nova geração de veículos, na qual a integração eletrônica e os sensores embarcados permitem uma atuação antecipada e precisa do sistema de frenagem, assegurando estabilidade mesmo em condições críticas, tais como frenagens em curvas, desvios bruscos ou condução sob chuva intensa.

Sob a ótica da engenharia automotiva, a presença dos sistemas eletrônicos reduz a dependência das reações humanas em situações de emergência. Tal fator é essencial, visto que estatísticas apontam que mais de 90% dos acidentes de trânsito decorrem de falhas humanas, como reações tardias ou manobras inadequadas (FMVSS, 2023).

Ademais, é importante destacar o aspecto normativo vigente no Brasil, onde, desde 2014, todos os veículos novos devem ser equipados com sistema ABS conforme estabelecido pela Resolução nº 380/2011 do Conselho Nacional de Trânsito. A seguir temos o Gráfico 1, mostrando o desempenho de frenagem de alguns modelos automotivos.

Gráfico 1 – Desempenho de frenagem



Fonte: Elaboração própria com base em fichas técnicas oficiais dos veículos disponíveis nos sites da Fiat (2025), Volkswagen (2025), Toyota (2025) e Mercedes (2025).

Por fim, a análise do desempenho em frenagens e estabilidade apresenta-se como um referencial útil para futuras decisões de compra por parte dos consumidores, que atualmente valorizam não apenas o custo inicial do veículo, mas também sua capacidade de proteger os ocupantes em diferentes condições de uso. Em síntese,

este capítulo confirma que o investimento em tecnologias de frenagem não apenas salva vidas, mas também eleva o padrão de condução, reduzindo custos relacionados a acidentes, manutenções corretivas e litígios decorrentes de falhas mecânicas evitáveis.

5. CONCLUSÃO

A evolução dos sistemas de frenagem automotiva reflete o avanço tecnológico e a crescente preocupação com a segurança veicular. Ao longo deste estudo, foi possível compreender como os princípios básicos da frenagem como: a conversão de energia cinética em térmica, deram origem a soluções cada vez mais eficientes, desde os freios mecânicos primitivos até os atuais sistemas inteligentes e eletrônicos.

Sistemas como o ABS, o controle de tração (TCS), o controle eletrônico de estabilidade (ESC) e o *Brake by Wire* demonstram que a frenagem deixou de ser apenas uma função mecânica para se tornar parte de um complexo ecossistema digital embarcado nos veículos. A integração desses recursos, como observado em modelos modernos, proporciona maior estabilidade, menor distância de parada e maior controle do veículo, mesmo em situações extremas.

A análise comparativa entre veículos com e sem essas tecnologias evidenciou ganhos concretos em termos de segurança, desempenho e dirigibilidade. Além disso, destacou-se a importância das normas regulatórias como a obrigatoriedade do ABS no Brasil desde 2014 e a tendência global de adoção de padrões mais elevados de segurança ativa.

Conclui-se que, portanto, que o desenvolvimento contínuo dos sistemas de frenagem deve ser prioridade no setor automotivo, não apenas como diferencial tecnológico, mas como compromisso com a preservação da vida. Investir em pesquisa, inovação e educação do consumidor são estratégias fundamentais para garantir que os avanços existentes cheguem a todos os segmentos de veículos, promovendo uma mobilidade mais segura, eficiente e inteligente.

5.1 Propostas Futuras

- Criação de um protótipo com sistema *Brake by Wire* didático para utilização na disciplina de freios
- Estudos mais aprofundados sobre as técnicas de controle de frenagem adaptativa usando ESC e ESP

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Pedro L. Mecânica Automotiva Moderna. 4. ed. São Paulo: Érica, 2020.

Apostila De treinamentos IV Volkswagen. 2025

BARBOSA, Pedro H.; RODRIGUES, Tiago M.; LIMA, Gabriel F. *Manutenção preventiva dos sistemas de freios automotivos: análise de falhas comuns*. Revista Científica da Faculdade de Engenharia da UNIVASF, v. 5, n. 1, p. 31–38, 2019. Acesso em 20.Jul 2025

BLÁZQUEZ, LUIS. Control electrónico de frenada (brake by wire). Coches.com, 15 de novembro de 2020. Disponível em: <https://www.coches.com/noticias/consejos/control-electronico-de-frenada-brake-by-wire/407056>. Acesso em: 10 jul. 2025.

Blog do professor Carlos

https://www.blogdoprofessorcarlao.com.br/2009/04/hidraulica-como-funciona-o-freio_24.html. Acesso em: 20 jul. 2025

BOSCH. Automotive Handbook. 8. ed. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2010.

BOSCH. Manual de Tecnologia Automotiva. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2016.

BOSCH. Tecnologia automotiva: sistemas de frenagem, ABS, ESP e controle de tração. 5. ed. Campinas: Bosch Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.bosch.com.br>. Acesso em: 20 jun. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 380/2011 – Torna obrigatório o uso do sistema de freios ABS em motocicletas e automóveis. Diário Oficial da União, Brasília, 2011. Disponível em: <https://www.gov.br>. Acesso em: 15 jun. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 380, de 11 de junho de 2011. Dispõe sobre a obrigatoriedade do sistema de freios ABS em veículos novos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 95, 14 jun. 2011.

CAMPOS, Rafael de Oliveira. Frenagem veicular: estudo técnico e evolução dos sistemas de freios automotivos. Revista Engenharia Automotiva, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 35-42, 2022.

CARVALHO, Luiz Fernando. Sistemas de freios: fundamentos, tipos e manutenção. 2. ed. São Paulo: Érica, 2019.

CUNHA, Roberto M. *Freios hidráulicos em veículos pesados: funcionamento e manutenção*. Revista de Engenharia Mecânica Aplicada, v. 8, n. 2, p. 55–63, 2020. Acesso em 20.Jul.2025.

DENSO. Brake Fluids Explained. Denso Global, 2020. Disponível em: <https://www.denso.com>. Acesso em: 18 jul. 2025.

DISCOS DE FREIO DE CARBONO, NAS RUAS E NAS PISTAS – Autoentusiastas. [S. I.], s.d. Acesso em: 16 jul. 2025.

FERREIRA, André L.; SOUZA, Mariana T. *Integração de sistemas eletrônicos e hidráulicos nos freios de estacionamento de veículos automotores*. Revista Tecnologia em Movimento, v. 11, n. 1, p. 21–28, 2021. Acesso em 20 Jul.2025.

FIAT. Fiat Uno Mille 2010 - Ficha Técnica Oficial. Stellantis Brasil, 2010. Disponível em: <https://www.fiat.com.br>. Acesso em: 18 jul. 2025.

FMVSS. Standard No. 105 – Hydraulic and electric brake systems. U.S. Department of Transportation – National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C., 2023a. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

FMVSS. Standard No. 126 – Electronic stability control systems. U.S. Department of Transportation – National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C., 2023c. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

FMVSS. Standard No. 135 – Light vehicle brake systems. U.S. Department of Transportation – National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C., 2023b. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov>. Acesso em: 16 jul. 2025.

GONÇALVES, Matheus A.; PEREIRA, Douglas R. Evolução dos sistemas Brake-by-Wire em veículos elétricos. Revista de Engenharia Mecânica Aplicada, Florianópolis, v. 7, n. 1, p. 45-59, 2023.

GUZZELLA, L.; SCIARRETTA, A. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. Springer, 2013.

HOBBS, Chris. *Automotive Safety and Security Systems*. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-88046-2.

INGO PNEUS. Como funciona o sistema de freio ABS. 2024. Disponível em: <https://ingopneus.com.br/como-funciona-o-sistema-de-freio-abs/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ISO 26262:2018. Road vehicles — Functional safety. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. Acesso em: 15 jul. 2025.

ISO 611:2003. Road vehicles — Braking of automotive vehicles and their trailers — Vocabulary. Geneva: International Organization for Standardization, 2003. Acesso em: 15 jul. 2025.

ISO 6312:2001. Road vehicles — Brake linings — Shear test procedure. Geneva: International Organization for Standardization, 2001. Acesso em: 15 jul. 2025.

KAIOHDUTRA. Freios ABS (Anti-lock Breaking System). 2015. Disponível em: <https://kaiohdutra.wordpress.com/2015/02/10/freios-abs-anti-lock-breaking-system/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

KLEIN, Thomas. Freios Inteligentes: Eletrônica em Veículos. Munique: Springer Automotive, 2022.

LOPES, Dirceu. Apostila de freios. Santo André: FATEC Santo André, Centro Paula Souza, 2023.

MARQUES, Rodrigo; SANTOS, Daniel. Sistemas ABS e controle de estabilidade: impacto na redução de acidentes. In: Congresso SAE BRASIL, 2021, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: SAE Brasil, 2021. p. 101-109.

MERCEDES-BENZ. Mercedes EQS 580 4MATIC – Ficha Técnica e Tecnologias. Mercedes-Benz Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.mercedes-benz.com.br>. Acesso em: 18 jul. 2025.

MIRANDA, Júlio C. Tecnologia dos Sistemas de Freio. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MIRANDA, Rafael. ESC: como funciona o sistema obrigatório em carros no Brasil em 2024. News MOTOR, 2024a. Disponível em: <https://newsmotor.com.br/esc-como-funciona-o-sistema-obrigatorios-em-carros-no-brasil-em-2024/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

MIRANDA, Rafael. ESC: como funciona o sistema obrigatório em carros no Brasil em 2024. News MOTOR, 2024b. Disponível em: <https://newsmotor.com.br/esc-como-funciona-o-sistema-obrigatorios-em-carros-no-brasil-em-2024/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

NBR 10966:2020. Cilindro mestre de freio – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2020. Acesso em: 17 jul. 2025.

NBR 10967-2:2011. Veículos rodoviários automotores — Requisitos para sistemas de freios — Parte 2: Disco de freio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2011. Acesso em: 17 jul. 2025.

NBR 10978:2021. Veículos rodoviários automotores – Sistema de freio com antitravamento – Requisitos de desempenho e diagnóstico. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2021. Acesso em: 17 jul. 2025.

NBR 13480:2012. Pastilhas de freio – Requisitos e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2012. Acesso em: 17 jul. 2025.

NBR 14019:2010. Veículos rodoviários automotores — Sistemas de freio — Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2010. Acesso em: 17 jul. 2025.

NBR 14019:1997. Veículos rodoviários automotores — Sistema de freios — Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1997. Acesso em: 17 jul. 2025.

NBR 6023:2018. Informação e documentação – Referências – Elaboração. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2018. Acesso em: 17 jul. 2025.

NBR ISO 4925:2011. Fluido para freios hidráulicos – Especificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2011. Acesso em: 17 jul. 2025.

NOBRES DO GRID. Sistemas de freio – 2^a parte. Nobres do Grid, 2014. Disponível em:

http://www.nobresdogrid.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=1230:sistemas-de-freio-2o-parte&catid=110:mao-na-graxa&Itemid=242. Acesso em: 10 jul. 2025.

REIMPELL, J.; STOLL, H. Tecnologia de automóveis: fundamentos técnicos. São Paulo: Hemus, 2001.

RODRIGUEZ, Henrique. Qual a diferença entre freios a disco ventilados, perfurados e sólidos? Quatro Rodas, 15 jun. 2025 Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/freios-ventilados-perfurados-e-solidos/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

SAE INTERNATIONAL. SAE J2205: Hydraulic Parking Brake Systems for Road Vehicles. Warrendale, PA, 2010. Acesso em 20.Jul.2025

SAE INTERNATIONAL. Brake Fluids and Their Properties. SAE Technical Paper Series, 2016.

SAE INTERNATIONAL. Electronic Stability Control Systems: Design and Function. Warrendale: SAE, 2019.

SANTOS, Mariana. Salão do carro “Como funciona o Controle de Tração.” Disponível em: <https://salaodocarro.com.br/como-funciona/controle-de-tracao.html>, 2012.

SILVA, Henrique T. Fundamentos dos Sistemas Veiculares. São Paulo: Ed. Mecatrônica Brasil, 2019.

SOUZA, Elder Umbelino. Análise do avanço tecnológico do sistema de freio automotivo. 2024. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024. Acesso em 20.jul 2025

TOYOTA DO BRASIL. Catálogo técnico Toyota Corolla Altis Hybrid 2023. São Bernardo do Campo: Toyota, 2023. Disponível em: <https://www.toyota.com.br>. Acesso em: 10 jun. 2025.

UNECE. Regulation No. 13: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to braking. Genebra: United Nations Economic Commission for Europe, 2022. Disponível em: <https://unece.org/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

UNITED STATES. National Highway Traffic Safety Administration. Traffic Safety Facts Annual Report 2022. Washington, D.C., 2022. Disponível em: <https://www.safercar.gov>. Acesso em: 21 jul. 2025.

VOLKSWAGEN DO BRASIL. Manual do proprietário VW Nivus Highline 2023. São Bernardo do Campo: VW Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.vw.com.br>. Acesso em: 10 jun. 2025.

GLOSSÁRIO

ABS (Anti-lock Braking System) – Sistema de freios antiblocantes que evita o travamento das rodas durante a frenagem, proporcionando maior controle e segurança.

Brake by Wire (BBW) – Sistema de frenagem eletrônico que substitui as conexões hidráulicas por sinais elétricos, eliminando o pedal mecânico.

DOT (Department of Transportation) – Classificação norte-americana para fluidos de freio, que determina os padrões de desempenho térmico e viscosidade.

Disco de cerâmica de carbono – Tipo de disco de freio feito com materiais ultra resistentes e leves, utilizado em carros de altíssima *performance*.

Disco ventilado – Disco de freio com canais internos que melhoram a dissipação de calor e evitam superaquecimento em frenagens intensas.

ESC (Electronic Stability Control) – Sistema de controle eletrônico de estabilidade que corrige automaticamente a trajetória do veículo em curvas ou derrapagens.

Fluido de freio – Líquido hidráulico que transmite a força do pedal de freio até as pastilhas ou lonas. Deve ter alta resistência à temperatura e à compressão.

Frenagem – Ação de desaceleração ou parada do veículo por meio da aplicação dos freios.

Pastilha de freio – Componente que exerce pressão sobre o disco de freio, gerando atrito necessário para a frenagem.

Sistema hidráulico – Mecanismo que utiliza fluido pressurizado para transmitir a força do pedal de freio aos mecanismos de frenagem nas rodas.

Tambor de freio – Tipo de sistema de frenagem onde as sapatas de freio pressionam internamente um tambor acoplado à roda.

TCS (Traction Control System) – Sistema de controle de tração que evita que as rodas patinem em acelerações bruscas ou em pisos escorregadios.