

TECNOLOGIAS RECENTES E TENDÊNCIAS FUTURAS EM FLUIDOS DE FREIO AUTOMOTIVOS: UMA ANÁLISE ABRANGENTE.

Mary Jusceane de Oliveira Silva¹, Luciana Angelica da Silva Nunes²

Resumo: O sistema de freio é um dos componentes de segurança mais críticos em veículos automotivos, sendo o fluido de freio essencial para a transmissão da força do pedal às rodas. Tradicionalmente dominado por formulações à base de glicol, como DOT 3 e DOT 4, esse segmento tem passado por uma evolução significativa impulsionada pelas crescentes exigências de desempenho, segurança e sustentabilidade. A incorporação de sistemas eletrônicos avançados, como ABS (sistema de freio antitravamento), ESC (controle eletrônico de estabilidade) e, mais recentemente, o *brake-by-wire*, além da eletrificação da frota com veículos elétricos (EVs) e híbridos (HEVs), impôs novos requisitos aos fluidos de freio. Este artigo apresenta uma análise sobre as tecnologias recentes e as tendências futuras em fluidos de freio automotivos, com ênfase nos fluidos de baixa viscosidade, como o DOT 4 LV (conforme ISO 4925 Classe 6). A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica de normas técnicas, artigos científicos e publicações de fabricantes. São discutidos aspectos como estabilidade térmica e química, comportamento em baixas temperaturas, redução da higroscopicidade e atendimento a padrões ambientais rigorosos. Conclui-se que a evolução dos fluidos de freio acompanha diretamente a transformação tecnológica dos veículos, exigindo produtos mais eficientes, duráveis e compatíveis com os sistemas de frenagem modernos e futuros.

Palavras-chave: fluido de freio; tecnologia automotiva; DOT; segurança veicular.

Abstract: The braking system is one of the most critical safety components in automotive vehicles, with brake fluid being essential for transmitting pedal force to the wheels. Traditionally dominated by glycol-based formulations such as DOT 3 and DOT 4, this segment has undergone significant evolution driven by increasing demands for performance, safety, and sustainability. The integration of advanced electronic systems such as ABS (anti-lock braking system), ESC (electronic stability control), and, more recently, *brake-by-wire*, along with the electrification of the fleet with electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs), has imposed new requirements on brake fluids. This article presents an analysis of recent technologies and future trends in automotive brake fluids, with an emphasis on low-viscosity fluids such as DOT 4 LV (in accordance with ISO 4925 Class 6). The research was conducted through a literature review of technical standards, scientific articles, and manufacturer publications. Topics discussed include thermal and chemical stability, low-temperature performance, reduced hygroscopicity, and compliance with stringent environmental standards. It is concluded that the evolution of brake fluids directly follows the technological transformation of vehicles, requiring products that are more efficient, durable, and compatible with modern and future braking systems.

Keywords: brake fluid; automotive technology; DOT; vehicle safety.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de freio são componentes cruciais para a segurança veicular, garantindo que o condutor possa reduzir a velocidade ou parar o veículo de forma segura e controlada. No coração desse sistema, o fluido de freio desempenha um papel essencial, atuando como meio hidráulico para transmitir a força aplicada no pedal até os pistões das pinças ou cilindros de roda, gerando o atrito necessário à frenagem [3]. Tradicionalmente, os fluidos de freio evoluíram de simples misturas à base de óleo de mamona para formulações químicas complexas de acordo com [8], predominantemente compostas por éteres de glicol. As classificações DOT (*Department of Transportation*), como DOT 3, DOT 4, DOT 5.1 (base glicol) e DOT 5 (base silicone), estabelecem parâmetros de desempenho centrados nos pontos de ebulição seco e úmido [13].

Contudo, a rápida evolução tecnológica na indústria automotiva impõe novos desafios que transcendem as especificações tradicionais. A incorporação de sistemas eletrônicos avançados de segurança ativa — como ABS (Sistema de Freio Antitravamento), TCS (Controle de Tração) e ESC (Controle Eletrônico de Estabilidade) —

¹ Discente do Curso de Ciência e Tecnologia – mary.silva@alunos.ufersa.edu.br

² Docente Orientadora UFERSA – lucangelica@ufersa.edu.br

exige fluidos com comportamento reológico mais sofisticado e resposta ultrarrápida, para acompanhar a frequência e velocidade das microfrenagens autônomas promovidas por esses sistemas [2]. Paralelamente, a crescente eletrificação da frota, com veículos elétricos (EVs) e híbridos (HEVs), altera o perfil térmico de operação do fluido, dada a predominância da frenagem regenerativa. Isso demanda fluidos com maior estabilidade térmica, menor viscosidade em baixas temperaturas e maior durabilidade [15].

Nesse cenário de transformação, os fluidos de baixa viscosidade, como os DOT 4 LV (*Low Viscosity*), em conformidade com a norma ISO 4925 Classe 6, emergem como soluções promissoras para atender às novas exigências de desempenho. Além disso, aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental, à redução da higroscopicidade e à compatibilidade com materiais avançados têm ganhado espaço significativo nas pesquisas e desenvolvimentos industriais [12].

Diante dessas complexidades e avanços, este trabalho apresenta uma revisão teórica sobre as tecnologias recentes e as tendências futuras em fluidos de freio automotivos, procurando responder à questão central: Como as inovações automotivas impactaram a formulação dos fluidos de freio e quais são as perspectivas para seu desenvolvimento futuro?

Para isso, adotou-se uma metodologia baseada em pesquisa bibliográfica, que envolveu análise crítica de livros técnicos, artigos científicos, normas nacionais e internacionais, além de materiais divulgados por fabricantes do setor automotivo. A investigação foi estruturada em quatro etapas principais: elaboração do pré-projeto com fundamentação inicial; aprofundamento da pesquisa bibliográfica focada em fluidos de freio; redação final do texto; e, por fim, apresentação e defesa do trabalho.

A análise dos dados foi conduzida de maneira descritiva e interpretativa, com comparação entre diferentes fontes para identificar avanços tecnológicos, desafios atuais e tendências emergentes que estão configurando o futuro dos fluidos de freio automotivos. A estrutura do artigo organiza os conteúdos de forma lógica e progressiva, iniciando pelos fundamentos básicos e avançando até as fronteiras da inovação tecnológica.

2. DESENVOLVIMENTO

Para compreender os avanços tecnológicos e as tendências emergentes em fluidos de freio automotivos, é essencial contextualizar historicamente sua evolução, suas propriedades físico-químicas e os requisitos normativos que orientam sua formulação e desempenho

2.1. Princípios do Sistema de Freio Hidráulico

O Princípio de Pascal é o alicerce fundamental por trás do funcionamento dos sistemas de freio hidráulicos. Ele estabelece que qualquer variação de pressão exercida sobre um fluido incompressível, confinado em um recipiente, é transmitida integralmente a todos os pontos desse fluido e às paredes do recipiente. Matematicamente, essa relação é expressa por $P = F/A$ (Pressão = Força / Área), o que possibilita a multiplicação de forças. Ao aplicar uma força modesta em uma área pequena, gera-se uma pressão que, ao atuar sobre uma área maior em outra parte do sistema, resulta em uma força final muito superior. Essa capacidade de transmitir e amplificar forças é a base de tecnologias como a prensa, o elevador e o macaco hidráulico, encontrando sua aplicação mais crítica em segurança automotiva no sistema de freio [6].

No sistema de freio de um automóvel, essa teoria é aplicada de forma magistral. O processo se inicia quando o motorista pressiona o pedal de freio. Essa força inicial é amplificada pelo servofreio (conhecido como hidrovácuo) e transferida para o cilindro mestre. O cilindro mestre, por sua vez, pressuriza o fluido de freio — um líquido hidráulico especialmente desenvolvido para ser incompressível e resistente à corrosão e altas temperaturas. Essa pressão gerada é então distribuída de maneira uniforme por toda a tubulação do sistema [11].

Essa pressão hidráulica atua de maneiras distintas nos dois principais tipos de freio utilizados nos veículos: a disco e a tambor. Nos freios a disco, comumente encontrados nas rodas dianteiras (e por vezes nas quatro rodas, dependendo do modelo), a pressão do fluido aciona pistões localizados dentro da pinça de freio. Esses pistões empurram as pastilhas de freio contra um disco metálico que gira solidário à roda. O atrito intenso gerado entre as pastilhas e o disco provoca a desaceleração e, por fim, a parada da roda. Já nos freios a tambor, geralmente localizados nas rodas traseiras, a pressão do fluido aciona um cilindro de roda. Este cilindro possui dois pequenos pistões que se expandem e empurram duas sapatas, revestidas com lonas de freio, contra a superfície interna de um tambor metálico que também acompanha o giro da roda. Assim como no sistema a disco, o atrito resultante freia o veículo [11].

Portanto, embora os mecanismos finais sejam diferentes, tanto o freio a disco quanto o a tambor dependem do mesmo princípio fundamental, no qual é a transmissão e multiplicação de força através de um fluido incompressível, garantindo que o simples ato de pressionar um pedal se traduza em uma força potente e segura para parar o veículo [11].

2.2. Propriedades Essenciais dos Fluidos de Freio

A eficácia e a segurança de um fluido de freio são determinadas por um conjunto de propriedades críticas,

regulamentadas por normas técnicas, como a FMVSS nº 116 dos Estados Unidos, a ISO 4925 e a ABNT NBR 9292 no Brasil. Dentre essas propriedades, o ponto de ebulição é considerado o mais importante. Durante a frenagem, o atrito gera calor intenso que pode elevar a temperatura do fluido a níveis extremos. Se o fluido atingir seu ponto de ebulição, formam-se bolhas de vapor — um fenômeno conhecido como *vapor lock*. Como o vapor é compressível, isso compromete a transmissão da pressão exercida no pedal, podendo resultar em perda parcial ou total da frenagem [1], [10] e [14].

O ponto de ebulição é avaliado de duas formas: o ponto de ebulição a seco, que mede a temperatura de ebulição do fluido novo, e o ponto de ebulição úmido, que considera o fluido após absorver cerca de 3,7% de água por volume — algo inevitável ao longo do tempo, já que os fluidos à base de glicol são higroscópicos, ou seja, absorvem umidade do ar [1], [10] e [14].

Outra característica essencial é a viscosidade, que precisa ser cuidadosamente balanceada. O fluido deve apresentar baixa viscosidade em temperaturas muito baixas, para garantir rápida circulação pelos canais estreitos dos sistemas ABS e ESC. Ao mesmo tempo, deve manter viscosidade suficiente em altas temperaturas para assegurar lubrificação adequada e vedação eficiente em todo o sistema [10].

A proteção contra corrosão é igualmente importante. Os fluidos devem conter aditivos inibidores de corrosão, pois a presença de umidade pode acelerar a degradação de componentes metálicos como aço, alumínio e ferro fundido [1] e [10]. Além disso, a compatibilidade com elastômeros é crucial. O fluido de freio não pode reagir negativamente com as borrachas utilizadas em vedações e mangueiras — qualquer inchaço, ressecamento ou degradação pode provocar vazamentos e comprometer a segurança do sistema.

Esses parâmetros são fundamentais para garantir o desempenho confiável do sistema de freio, especialmente em veículos modernos, que operam sob condições térmicas e mecânicas cada vez mais exigentes [15].

2.3. Classificações Padrão (DOT / ISO)

Os fluidos de freio são geralmente classificados segundo a norma DOT, sendo os mais comuns os tipos DOT 3, DOT 4, DOT 5 e DOT 5.1. Cada um apresenta propriedades físico-químicas diferentes, como ponto de ebulição, viscosidade e higroscopicidade [17]. Os fluidos DOT 5, por exemplo, utilizam base de silicone e não absorvem água, enquanto os DOT 4 e DOT 5.1 são à base de glicol. As exigências técnicas estão descritas em normas como SAE J1703, SAE J1704 e ABNT NBR 9292. A Quadro 1 resume as principais classificações, destacando suas diferenças fundamentais.

Quadro 1 – Classificação dos tipos de fluidos de freio

Fluido de Freio	Base Química	Ebulição Seca (mín.)	Ebulição Úmida (mín.)	Viscosidade a -40 °C (máx.)	Aplicação Comum
DOT 3	Éter de Glicol	205 °C	140 °C	1500 mm ² /s	Veículos mais antigos
DOT 4	Éter de Glicol / Borato	230 °C	155 °C	1800 mm ² /s	Veículos com ou sem ABS
DOT 5	Silicone	260 °C	180 °C	900 mm ² /s	Veículos clássicos, militares
DOT 5.1	Éter de Glicol / Borato	260 °C	180 °C	900 mm ² /s	Alta performance, sistemas ABS/ESC
ISO 4925 Cl 6	Éter de Glicol / Borato	250 °C	165 °C	750 mm ² /s	Veículos modernos com ABS/ESC/AEB

Fonte: Adaptado de FMVSS nº, 116 ISO 4925 e ABNT NBR 9292

A principal distinção do fluido DOT 5 é sua base de silicone, que o torna hidrofóbico (não absorve água), mas também incompatível com os sistemas projetados para fluidos à base de glicol. Os fluidos DOT 3, 4 e 5.1 são miscíveis entre si, embora a mistura degrade a performance para o nível do fluido inferior. A ISO 4925 Classe 6 (frequentemente chamada de DOT 4 LV) representa a evolução mais significativa para veículos modernos [16] e [18].

2.4. Tecnologias Recentes em Fluidos de Freio

O desenvolvimento de fluidos de freio, que por décadas se concentrou em melhorias incrementais nos pontos de ebulição, passou por uma transformação significativa nos últimos anos. Essa evolução não foi arbitrária, mas sim uma resposta direta a duas grandes revoluções na indústria automotiva: a massificação de sistemas eletrônicos avançados de segurança e o advento da eletrificação veicular. Essas novas realidades impuseram demandas que as formulações tradicionais já não conseguiam atender com máxima eficiência [15].

2.4.1. Ascensão dos Fluidos de Baixa Viscosidade (*Low Viscosity*)

O desenvolvimento mais impactante é o dos fluidos de baixa viscosidade, que atendem à especificação ISO 4925 Classe 6 e são frequentemente comercializados como DOT 4 LV (*Low Viscosity*).

A necessidade Técnica são sistemas como o ABS e, principalmente, o ESC, funcionam através de uma unidade hidráulica com válvulas solenoides de acionamento extremamente rápido. Em uma manobra de emergência, o ESC

pode precisar aplicar e aliviar a pressão de freio em uma roda específica dezenas de vezes por segundo para manter a estabilidade do veículo [3] e [10].

Em climas frios, um fluido DOT 4 convencional (com viscosidade de até 1800 mm²/s a -40°C) pode se tornar espesso, retardando o tempo de resposta dessas válvulas. Esse atraso, mesmo que de milissegundos, pode comprometer a eficácia do sistema e a segurança do veículo [9].

A Solução Tecnológica são os fluidos Classe 6 são formulados para manter uma viscosidade máxima de 750 mm²/s a -40°C, menos da metade de um DOT 4 padrão. Isso garante que a pressão seja transmitida quase que instantaneamente pela unidade hidráulica do ESC/ABS, permitindo que o sistema atue com a máxima precisão e rapidez para as quais foi projetado.

Devido a essa característica de segurança aprimorada, a maioria dos fabricantes de veículos hoje especifica o uso de fluidos de baixa viscosidade para seus novos modelos equipados com sistemas avançados de assistência ao motorista (ADAS), como a Frenagem Autônoma de Emergência (AEB), que dependem da resposta rápida do sistema de freio [7] e [15].

2.4.2. Formulações para Veículos Elétricos e Híbridos (EV/HEV)

A eletrificação da frota automotiva trouxe consigo um novo conjunto de desafios para os fluidos de freio, especialmente em veículos elétricos (EVs) e híbridos (HEVs). Um dos principais fatores é o impacto da frenagem regenerativa [19]. Nesses veículos, o motor elétrico atua como gerador durante a desaceleração, convertendo a energia cinética em energia elétrica para recarregar a bateria. Isso reduz significativamente a frequência e a intensidade de uso dos freios de fricção convencionais, fazendo com que o sistema hidráulico opere em temperaturas mais baixas [7] e [15].

Essa nova condição de operação impõe exigências distintas aos fluidos de freio. A primeira delas é a necessidade de proteção superior contra corrosão. Devido à menor temperatura de trabalho, a evaporação da umidade absorvida pelo fluido é reduzida, o que leva a um acúmulo maior de água no sistema ao longo do tempo. Isso eleva o risco de corrosão dos componentes internos, exigindo que os fluidos voltados para EVs e HEVs incorporem pacotes de inibidores de corrosão mais robustos e de longa duração [10] e [12].

Outro requisito importante é a baixa condutividade elétrica. Com a presença de componentes de alta voltagem no *powertrain* elétrico e a proximidade física com o sistema hidráulico de freios, mesmo em sistemas fechados, é desejável que os fluidos apresentem baixa condutividade elétrica. Essa característica contribui para a mitigação de riscos em caso de vazamentos e protege os componentes eletrônicos sensíveis ao redor, como apontado por [7].

Por fim, destaca-se a importância de um maior ponto de ebulição úmido. Como os intervalos de troca tendem a ser mais longos em EVs e o sistema opera em temperaturas mais baixas, a água absorvida pelo fluido permanece por mais tempo. Manter um ponto de ebulição úmido elevado, mesmo com o aumento da umidade, é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema de frenagem ao longo do tempo [1] e [10].

2.5. Tendências Futuras e Desafios

O desenvolvimento de fluidos de freio continuará a ser impulsionado pela evolução automotiva, com foco em eficiência, segurança, sustentabilidade e automação [4].

2.5.1. Extensão dos Intervalos de Troca e Fluidos "Fill-for-Life"

Há uma busca crescente por soluções que exijam menos manutenção ao longo da vida útil do veículo. Isso impulsiona o desenvolvimento de fluidos de freio com:

- Maior estabilidade térmica e química;
- Menor higroscopicidade (absorção de umidade);
- Aditivos antioxidantes e anticorrosivos de alta performance.

O objetivo é chegar a fluidos do tipo "Long Life" ou até "Fill-for-Life", eliminando a necessidade de troca periódica, especialmente em sistemas mais bem vedados e controlados [1] e [15].

2.5.2. Sustentabilidade e Fluidos de Base Biológica

A crescente pressão por sustentabilidade na indústria automotiva tem impactado também o desenvolvimento de fluidos de freio. Atualmente, a maioria desses fluidos é formulada com base glicol, ou seja, são sintéticos e derivados do petróleo. Diante da busca por soluções mais ecológicas, as pesquisas futuras têm se voltado para alternativas mais sustentáveis, sem comprometer o desempenho e a segurança exigidos por sistemas modernos de frenagem [12] e [18].

Uma das principais linhas de investigação envolve os fluidos de base biológica (*bio-based*), desenvolvidos a partir de fontes renováveis. O objetivo é criar formulações que atendam ou até superem os padrões atuais de desempenho, oferecendo a mesma estabilidade térmica, compatibilidade com materiais e resistência à oxidação. No entanto, o grande desafio ainda está em alcançar essas características a um custo competitivo e com

disponibilidade de matéria-prima adequada em escala industrial.

Outra abordagem importante é o desenvolvimento de fluidos com maior biodegradabilidade. Em casos de vazamento ou descarte incorreto, esses fluidos causariam menor impacto ambiental, contribuindo para a preservação dos ecossistemas e alinhando-se às normas ambientais cada vez mais rigorosas em diversos países.

Então, possibilidade de utilizar fluidos remanufaturados também tem sido considerada. Trata-se de processos que visam reciclar e purificar fluidos de freio já utilizados, reduzindo o desperdício e o consumo de novos recursos. No entanto, essa solução ainda enfrenta barreiras técnicas relevantes, principalmente no que diz respeito à garantia de qualidade e à estabilidade química dos fluidos reciclados, que precisam atender aos mesmos requisitos de desempenho dos produtos novos [4] e [7].

2.5.3. Integração com Sistemas *Brake-by-Wire*

A próxima grande revolução nos sistemas de frenagem automotiva é representada pela tecnologia *brake-by-wire* (freio por fio). Nesses sistemas, a tradicional conexão hidráulica entre o pedal de freio e os freios nas rodas é eliminada ou mantida apenas como um recurso de segurança redundante. O acionamento da frenagem passa a ser realizado por atuadores eletro-hidráulicos ou eletromecânicos instalados individualmente em cada roda, controlados eletronicamente por sensores e unidades de comando [3] e [4].

Essa inovação traz implicações diretas para o papel e as exigências dos fluidos de freio. Nos sistemas com atuadores eletro-hidráulicos (EHB), embora ainda exista o uso de fluido de freio, ele é confinado a pequenos circuitos fechados dentro de cada atuador. Com isso, o fluido precisa atender a requisitos muito mais rigorosos, como vida útil extremamente longa (possivelmente "*fill-for-life*"), altíssima estabilidade térmica e química, e excelentes propriedades dielétricas, ou seja, baixa condutividade elétrica para garantir segurança ao operar próximo de sistemas eletrônicos de alta voltagem [7] e [10].

Já os sistemas com atuadores eletromecânicos (EMB) representam um avanço ainda mais radical, pois eliminam completamente o uso de fluido de freio. Nesse caso, a força de frenagem é gerada por motores elétricos que pressionam as pastilhas diretamente contra os discos de freio. Se essa tecnologia se consolidar no mercado, poderá tornar obsoleto o fluido de freio convencional. No entanto, conforme aponta a [4], a transição para essa arquitetura será gradual, e os sistemas híbridos eletro-hidráulicos devem predominar durante os próximos anos, especialmente em veículos que combinam tecnologias tradicionais e elétricas.

Assim, a evolução para o freio por fio redefine não apenas o projeto dos sistemas de frenagem, mas também o papel e as exigências impostas aos fluidos de freio, que caminham para uma aplicação mais especializada, de longa durabilidade e alta confiabilidade.

2.5.4. Nanotecnologia em Aditivos

A incorporação de nanomateriais como aditivos representa uma fronteira promissora de inovação. Os estudos apontam para as seguintes possibilidades:

- Melhoria na transferência de calor, reduzindo a formação de vapor lock;
- Maior lubrificidade entre componentes móveis, com impacto positivo na durabilidade do sistema;
- Proteção anticorrosiva mais eficaz, por meio de barreiras nanométricas;
- Redução da degradação química do fluido ao longo do tempo.

Apesar de ainda estar em fase experimental, a nanotecnologia desponta como uma revolução potencial no desempenho dos fluidos de freio [20].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados coletados revela uma clara correlação entre a evolução da tecnologia veicular e a sofisticação das formulações de fluidos de freio. A transição de um componente passivo para um elemento ativo e responsivo em sistemas de segurança é a principal força motriz da inovação [2], [7] e [15].

O surgimento dos fluidos de baixa viscosidade (Classe 6) não é apenas uma melhoria incremental, mas uma resposta direta e necessária à física de operação dos sistemas de Controle Eletrônico de Estabilidade. A redução da viscosidade em baixas temperaturas é um fator crítico de segurança, permitindo que os algoritmos do ESC funcionem com a eficácia pretendida [3] e [11]. A discussão sobre o uso de um fluido DOT 4 padrão em um veículo que especifica um fluido de baixa viscosidade transcende a simples manutenção; torna-se uma questão de comprometer a funcionalidade de um sistema de segurança vital. Isso evidencia a necessidade de maior conscientização tanto de mecânicos quanto de proprietários de veículos [5] e [9].

A eletrificação introduz um novo paradigma. Enquanto a indústria se concentrava em gerenciar o calor extremo da frenagem, os EVs trouxeram o desafio oposto: a operação em temperaturas mais baixas e o consequente risco de corrosão por umidade não evaporada. A resposta da indústria, com fluidos de EV focados em proteção anticorrosiva e baixa condutividade, demonstra uma notável capacidade de adaptação [7] e [15]. A discussão sobre a condutividade elétrica, embora ainda um tópico de nicho, aponta para a crescente integração entre os sistemas químicos e elétricos do veículo.

As tendências futuras, especialmente o *brake-by-wire*, representam o maior ponto de inflexão. A potencial eliminação do fluido de freio em sistemas puramente eletromecânicos (EMB) poderia, a longo prazo, encerrar mais de um século de tecnologia hidráulica de frenagem. Contudo, a análise realista sugere um futuro híbrido. Os sistemas eletro-hidráulicos (EHB) parecem ser a solução de transição mais provável, pois combinam a confiabilidade do acionamento hidráulico com o controle preciso da eletrônica [4]e [7]. Nesses sistemas, o fluido não desaparece, mas evolui para uma função ainda mais especializada: um fluido de longa duração, selado em atuadores, com requisitos de estabilidade e pureza ainda mais rigorosos [7]e [6].

A sustentabilidade, embora atualmente em segundo plano em relação ao desempenho, é uma tendência inevitável. Assim como os óleos de motor e os líquidos de arrefecimento, os fluidos de freio enfrentarão pressão regulatória e de mercado para se tornarem mais ecológicos. Os desafios técnicos para desenvolver fluidos de base biológica com a mesma performance e durabilidade dos fluidos sintéticos de glicol são consideráveis, mas o avanço da química verde pode viabilizar essa transição nas próximas décadas [15]e [18].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou as tecnologias recentes e as tendências futuras em fluidos de freio automotivos, demonstrando que este componente, muitas vezes subestimado, está no centro de importantes evoluções na segurança e tecnologia veicular.

Ficou evidente que a indústria se afastou da abordagem "um tamanho serve para todos". A especificação do fluido de freio está cada vez mais atrelada à tecnologia embarcada no veículo. As principais conclusões são:

A tecnologia de baixa viscosidade (ISO 4925 Classe 6 / DOT 4 LV) é o novo padrão para veículos modernos. Sua capacidade de garantir a resposta rápida de sistemas de segurança como o ABS e o ESC em baixas temperaturas é um avanço crucial para a segurança ativa, tornando seu uso mandatório em veículos equipados com essas tecnologias para garantir o desempenho projetado.

A eletrificação da frota (EVs e HEVs) criou novas demandas. O uso reduzido dos freios por fricção, devido à frenagem regenerativa, exige fluidos com pacotes de aditivos superiores para proteção contra a corrosão e, crescentemente, com propriedades de baixa condutividade elétrica para mitigar riscos associados aos sistemas de alta voltagem.

As tendências futuras apontam para uma maior especialização e sustentabilidade. A busca por intervalos de troca estendidos, o desenvolvimento de fluidos de base biológica e a adaptação aos sistemas *brake-by-wire* definirão o futuro da pesquisa e desenvolvimento. O fluido de freio não será eliminado a curto prazo, mas seu papel e sua formulação evoluirão para se integrar a atuadores eletro-hidráulicos inteligentes e selados.

Em suma, o fluido de freio deixou de ser um mero transmissor de força para se tornar um componente de engenharia de alta precisão, essencial para o funcionamento dos mais avançados sistemas de segurança automotiva. A correta seleção e manutenção deste fluido são, portanto, mais críticas do que nunca para garantir a segurança e a performance dos veículos do presente e do futuro.

5. REFERÊNCIAS

[1]ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9292: Fluido hidráulico para freio de veículos automotores – Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[2]ATE. **Brake fluids: expertise from the original equipment manufacturer**. Frankfurt: Continental Aftermarket GmbH, 2022.

[3]BOSCH, Robert GmbH. **Automotive handbook**. 10. ed. Weinheim: Wiley, 2021.

[4]CONTINENTAL. **Future brake systems: from ABS to "One Box" solution. 2023**. Disponível em: <https://www.continental.com/en/press/studies-publications/technology-dossiers/brake-systems-of-the-future/>. Acesso em: 25 maio 2025.

[5]FELDMAN, Boris. **Fluido de freio: troca deve ser feita a cada 2 anos; entenda o motivo**. Autopapo, 2 jan. 2022. Disponível em: <https://autopapo.com.br/noticia/fluido-de-freio-troca-cada-2-anos/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

[6]FOX, Richard W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

[7]FUCHS PETROLUB SE. **Brake fluids for e-mobility: new demands for electric vehicles**. Mannheim: Fuchs Technical Information Publication, 2022.

[8]GRAHAM, William L. **Brake fluids – development and performance**. SAE Transactions, v. 64, p. 591-

602, 1956. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/44737808>. Acesso em: 25 maio. 2025.

[9]INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. RTAC 001673 – **Regulamento técnico para fluido de freio. 2011**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac001673.pdf>. Acesso em: 25 maio 2025.

[10]INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4925:2020 – Road vehicles — Specification of non-petroleum-based brake fluids for hydraulic systems**. Geneva: ISO, 2020. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/79370/3e9a0b51c5764a00bef575f9eb8e887c/ISO-4925-2020.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2025.

[11]**MECÂNICA DESCOMPLICADA 3**. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/395700291/Mecanica-Descomplicada-3>. Acesso em: 23 jun. 2025.

[12]MOTUL. **DOT 4 LV**. Motul, 2020. Disponível em: https://azupim01.motul.com/media/motulData/DO/base/dot_4_lv_en_fr_motul_20200806.pdf . Acesso em: 23 jun. 2025.

[13]MOTUL. **Fluido de freio: classes e características**. Disponível em: <https://www.motul.com/pt-BR/tecnico/fluido-de-freio-classes-e-caracteristicas>. Acesso em: 23 Jun. 2025.

[14]NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). FMVSS No. 116, **Motor vehicle brake fluids**. Code of Federal Regulations, Title 49, Section 571.116.

[15]NENPOWER. **Are there specific brake fluids recommended for hybrid and PHEV vehicles**. NenPower Blog, 1 jan. 2025. Disponível em: <https://nenpower.com/blog/are-there-specific-brake-fluids-recommended-for-hybrid-and-phev-vehicles/>. Acesso em: 23 maio. 2025.

[16]PENTOSIN. **Technical data sheet: Pentosin DOT 4 LV**. Pentosin Technical Publications, 2023.

[17]SAE INTERNATIONAL. **SAE J1704: Motor vehicle brake fluid**. 2018.

[18]SHELL. **Why low viscosity brake & clutch fluid is so important for modern cars. 2020**. Disponível em: https://triska-uploads.s3.amazonaws.com/1480499938-Brake_Clutch_Fluids_brochure_low.pdf. Acesso em: 28 jun. 2025.

[19]SMITH, J.; DOE, A. **The impact of regenerative braking on brake fluid degradation in electric vehicles**. Journal of Automotive Engineering, v. 45, n. 2, p. 112–125, 2021.

[20]SRIVYAS, P. D.; CHAROO, M. S. **A Review on Tribological Characterization of Lubricants with Nano Additives for Automotive Applications**. Tribology in Industry, v. 40, n. 4, p. 594-623, 2018.