



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

Lubrificantes aplicados a transmissões automáticas de veículos automotores: História, reologia e aplicações.

Acadêmico: Enzo Caliali

Orientador: Prof. Dr. Anderson Reginaldo Sampaio

Maringá, 11 de março de 2024

Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

Lubrificantes aplicados a transmissões
automáticas de veículos automotores: História,
reologia e aplicações.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do Prof. Dr. Anderson Reginaldo Sampaio, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Física.

Acadêmico: Enzo Caliali

Orientador: Prof. Dr. Anderson Reginaldo Sampaio

Maringá, 11 de março de 2024

Enzo Caliali

Lubrificantes aplicados na transmissões
automáticas de veículos atomotores: História,
reologia e aplicações.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do Prof. Dr. Anderson Reginaldo Sampaio, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Física.

Aprovado em —/—/—

Banca Examinadora

Prof. Dr. Anderson Reginaldo Sampaio

Prof. Dr. Danilo Degan Lüders

Prof. Dra. Glécilla Colombelli de Souza Nunes

Agradecimentos

À minha namorada Brizza, por me acompanhar e apoiar desde antes do início deste trabalho.

A meus pais Helsio e Euza, por me proporcionarem a oportunidade estudar o que amo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson Sampaio pela infinita paciência e ajuda durante todo o processo.

Conteúdo

| | |
|--|-----------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | iv |
| Abstract | v |
| 1 Introdução | 1 |
| 2 Noções reológicas básicas. | 4 |
| 2.1 Classificação reológica dos fluidos. | 5 |
| 2.1.1 Fluidos Newtonianos. | 5 |
| 2.1.2 Fluidos não-Newtonianos | 5 |
| 2.1.3 Viscoelasticidade. | 8 |
| 2.2 Índice de viscosidade. | 10 |
| 3 Princípios de funcionamento de uma transmissão automática típica. | 12 |
| 3.1 Engrenagens planetárias. | 12 |
| 3.2 Conversor de torque. | 13 |
| 3.3 Pacotes de embreagem. | 14 |
| 3.4 Transmissões automatizadas e continuamente variáveis. | 14 |
| 4 Propriedades. | 16 |
| 4.1 Viscosidade. | 16 |
| 4.2 Ponto de fluidez. | 16 |
| 4.3 Gravidade específica. | 17 |
| 4.4 Volatilidade. | 17 |
| 4.5 TAN e TBN. | 17 |
| 4.6 Densidade. | 18 |
| 4.7 Calor específico e coeficiente de expansão térmica. | 18 |
| 4.8 Coeficiente de atrito. | 18 |
| 4.9 Módulo de compressibilidade | 19 |
| 5 Aditivos. | 20 |
| 5.1 Modificadores de viscosidade. | 20 |
| 5.2 Diminuidores de ponto de fluidez. | 21 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.3 | Modificadores de atrito. | 22 |
| 5.4 | Agentes de pressão extrema e anti-desgaste. | 22 |
| 5.5 | Antioxidantes. | 22 |
| 5.6 | Detergentes e dispersantes. | 22 |
| 5.7 | Antiespumantes e desemulsificantes. | 23 |
| 5.8 | Inibidores de ferrugem e desativadores de metais. | 23 |
| 6 | Óleos base - <i>basestock</i>. | 25 |
| 6.1 | Produção. | 25 |
| 6.2 | Classificação dos óleos base. | 27 |
| 6.3 | Propriedades dos óleos base. | 28 |
| 6.3.1 | Influências dos óleos base nas propriedades do ATF. | 29 |
| 7 | Noções básicas de tribologia. | 33 |
| 7.1 | Tribologia aplicada aos ATF's. | 34 |
| 8 | Avaliação reológica de ATF's em diferentes condições de serviço. | 35 |
| 8.1 | Metodologia. | 36 |
| 8.1.1 | Amostras estudadas. | 36 |
| 8.1.2 | Reologia rotacional e oscilatória. | 36 |
| 8.1.3 | Resultados e discussão. | 37 |
| 9 | Considerações finais | 42 |
| | Referências Bibliográficas | 46 |

Resumo

Criado no fim do século XVIII, o automóvel moderno mudou a forma como a sociedade se locomove. Nele, o sistema de transmissão é responsável por levar energia do motor para suas rodas. O presente trabalho tem por objetivo discorrer acerca da evolução dos fluidos lubrificantes utilizados em transmissões automáticas, desde sua história, abrangendo pontos chave de desenvolvimento e inovações; composição, incluindo aditivação e atuação dos componentes; fabricação, definições de óleos base e influências no fluido finalizado; propriedades físicas relevantes para o fenômeno da lubrificação e aplicações tribológicas básicas, além de uma apresentação das noções fundamentais da reologia, por meio de uma revisão bibliográfica baseada em artigos científicos, técnicos e livros sobre o assunto. Por fim, utilizando um reômetro modelo HAAKE MARS II, disponibilizado pelo COMCAP, foi realizada uma avaliação das mudanças nas propriedades reológicas de duas amostras de fluido lubrificante de mesma norma, submetidas a diferentes condições de serviço, revelando sua natureza newtoniana e perdas permanentes de viscosidade evidenciadas como funções da temperatura e taxa de cisalhamento.

Palavras-Chave: Lubrificante, Reologia, Transmissão automática.

Abstract

Created in the end of the 18th century, the modern automobile changed the way society moves. The transmission system is responsible for taking energy from the engine to its wheels. The present work aims to discuss the evolution of lubricant fluids applied to automatic transmissions, since its history, covering key points of development and innovations; composition, including additives and component operation; manufacturing, base oil definitions and influences on the finished fluid; physical properties relevant to the lubrication phenomenon and basic tribological applications, in addition to a of the fundamental notions of rheology through a bibliographic review based on scientific articles, technical papers and books on the subject. Finally, using a HAAKE MARS II rheometer, provided by COMCAP, an evaluation of the changes in the rheological properties of two lubricating fluid samples of the same norm, subjected to different service conditions was carried out, revealing its Newtonian nature and permanent viscosity losses evidenced as functions of temperature and shear rate. **Keywords:** Lubricant, rheology, automatic transmission.

Capítulo 1

Introdução

Antes que os automóveis fossem popularizados, desde as primeiras máquinas a vapor, as transmissões desempenham o papel fundamental de transmitir o torque do motor ao restante do conjunto, essencialmente multiplicando a rotação do motor por um fator chamado relação de marcha, assim permitindo que a máquina trabalhe dentro da faixa ideal de potência e torque. Neste contexto, um dos primeiros projetos para uma transmissão manual capaz de levar um veículo a alcançar três diferentes faixas de velocidade veio pelas mãos do pioneiro Emille Levassor, em 1895 (SOCIN; WALTERS, 1968). Esta excelente invenção, apesar de funcional, tinha uma operação difícil e desprazerosa, muitas vezes evitada, até que, no fim da década de 1910, o engenheiro *Earl Avery Thomson*, projetou o sistema *Synchromesh* de transmissão manual, implementando anéis sincronizadores, que facilitavam as trocas de marchas e popularizaram a invenção.

Com o objetivo de simplificar o processo de dirigir um carro, nos anos de 1910 a montadora Chrysler criou os primeiros protótipos de sistemas de transmissão automática, como por exemplo a AST (*Automatic Safety Transmission*) e a "*Fluid Drive*" (KOBE; WAGNER, 1968). No entanto, estas se limitavam a eliminar a necessidade de operação de um pedal de embreagem ou apenas evitar que o motor entre em estado de "*stall*"¹. A primeira transmissão verdadeiramente automática bem sucedida foi criada por *Earl Avery Thomson*, no ano de 1939, sendo batizada de "*Hydramatic*" (BROMBERGS, 1987). A "*Hydramatic*" foi comercializada pela montadora General Motors a partir de 1940. Ela era equipada com engrenagens planetárias e um sistema de acoplamento hidráulico, responsável por alternar entre quatro velocidades diferentes. Para esta aplicação, a General Motors desenvolveu um fluido capaz de desempenhar as funções de lubrificação, e ao mesmo tempo, atuar como fluido hidráulico, fazendo nascer o primeiro fluido de transmissão automática propriamente dito, e chamando-o "*GM Transmission Fluid No.1*". Na época, outras montadoras produziram suas próprias transmissões automáticas, tomando como base os conversores de torque (acoplamento hidráulico) e engrenagens planetárias, contudo, em sua maioria, adotavam a norma "*GM Transmission Fluid No.1*" como padrão.

Os problemas e a dificuldade em lidar com altas temperaturas motivaram, nos anos seguintes, o desenvolvimento de novos fluidos, cujo maior representante foi o "*GM Type A*", também adotado pelas demais montadoras (BROMBERGS, 1987). Este segundo fluido, bem como

¹Desligamento do motor.

seus sucessores, foi produzido tomando como base um óleo de natureza animal, dopado de um conjunto de aditivos que reduziam a oxidação, formação de espuma, corrosão e outros. Especificamente, o óleo de baleia Cachalote era frequentemente escolhido devido a suas propriedades antioxidantes, no entanto, é importante salientar que esta base deixou de ser usada a partir dos anos 1970, por determinações relacionadas à preservação ambiental.

A participação da Ford como construtora de transmissões automáticas se inicia na década de 1950, sendo o seu equipamento oferecido como item opcional, e recomendando a norma "GM Type A", até que esta foi substituída pela nova "GM Type A suffix A", também adotada pelas demais montadoras até a introdução de novas normas no mercado, produzidas por grandes nomes como *Delco*, *Texaco*, *Quaker State* e *Mopar*, todas semelhantes em composição e propriedades, gerando, inclusive, casos de compatibilidade completa entre duas ou mais especificações. Enquanto as montadoras Chrysler, General Motors e Ford dominavam o mercado das transmissões automáticas no ocidente, durante a década de 1960, a Toyota estreava sua nova transmissão automática, denominada "A20", empregando a norma "GM Type A suffix A".

A década de 1970 representou grandes mudanças para os ATF's (*Automatic Transmission Fluids*), dentre as quais, a necessidade de reduzir o consumo de combustível, que forçou as montadoras a incluir uma nova relação de marcha "overdrive"², conseqüentemente requerendo um melhoramento das propriedades reológicas dos ATF's, especificamente sobre a viscosidade, a fim de manter o regime de lubrificação tribológico adequado. Em 1971, os métodos de preparação dos óleos base usados na produção de ATF's foram grandemente atualizados com o advento dos óleos base de grupo II que, mais tarde, seriam superados por óleos de grupo III e sintéticos.

Outra das numerosas inovações que compuseram a evolução das transmissões automáticas ocorreu por parte da Toyota, com a primeira transmissão controlada eletronicamente via conjuntos de válvulas solenoides, instigando novamente uma melhoria das propriedades dos ATF's, agora relacionada à sua condutividade e resistividade elétrica. Surge neste momento, partindo da General Motors, a norma "DEXRON" e suas várias edições posteriores, inaugurando uma era de competições entre fabricantes de transmissões automáticas e seus fluidos lubrificantes (BROMBERGS, 1987). Conforme o passar dos anos, a aplicabilidade de cada fluido se afunilou, isto é, as transmissões mais modernas passaram a exigir fluidos gradativamente mais específicos e assim o mercado rapidamente se viu repleto de normas para ATF's, como maiores exemplos, destacam-se a linha "MERCON" sob controle Ford, "DEXRON" por parte da General Motors, "ATF+" com Chrysler e "ATF WS" desenvolvida pela Toyota.

Portanto, estando claro o grande avanço dos ATF's, com relação à sua fabricação e propriedades ao longo dos anos, estudar as motivações dessas mudanças, bem como a composição e comportamento de um fluido de transmissão automática é de grande importância, por possibilitar que o seu aprimoramento se estenda, acompanhando as gradativamente mais eficientes transmissões automáticas do mercado. Nesse sentido, o entendimento do desempenho reológico de um ATF é essencial na medida em que explicita o comportamento da sua viscosidade em variadas condições.

Esta monografia está organizada em capítulos, sendo o capítulo 2 destinado a apresentar

²Relação entre 0 e 1, em que a transmissão gira mais rápido que o motor.

os conceitos básicos da reologia mais relevantes para o estudo dos fluidos de transmissão automática. O capítulo 3 expõe os mecanismos fundamentais de funcionamento das transmissões automáticas relacionados ao fluido lubrificante. Os próximos capítulos tratam especificamente dos ATF's, sendo o capítulo 4 referente às propriedades gerais apresentadas pelos fluidos de transmissão automática, enquanto o capítulo 5 expõe informações acerca da composição dos aditivos presentes na formulação do lubrificante. O capítulo 6 se dedica à explicação da produção dos óleos base, bem como sua classificação em grupos e o capítulo 7 trata dos conceitos básicos da tribologia aplicada a uma transmissão automática. Como ilustração, o capítulo 8 apresenta os resultados obtidos de ensaios reológicos realizados com ATF's submetidos a serviço em transmissões reais.

Capítulo 2

Noções reológicas básicas.

A reologia é o ramo da Física que estuda as deformações e escoamentos da matéria. A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida. Ela é uma medida da capacidade de um fluido fluir facilmente e é um dos atributos mais importantes para o fenômeno da lubrificação entre as diversas partes metálicas em contato direto dentro de uma transmissão automática. Do ponto de vista da reologia existem dois tipos de viscosidade: cinemática e absoluta, também conhecida como viscosidade dinâmica (MACOSKO, 1994).

A viscosidade cinemática avalia as deformações provocadas ao fluido pela ação da força gravitacional. Ela pode ser medida a partir do método de tubo capilar e do método de Stokes. A viscosidade dinâmica avalia as deformações provocadas no fluido por forças de cisalhamento, ela é medida via método de Newton a partir da razão entre a tensão de cisalhamento por sua taxa de cisalhamento correspondente.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

Sendo η a viscosidade dinâmica, τ a tensão cisalhante e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação, no sistema internacional de unidades (SI) a viscosidade cinemática é representada em $[\text{m}^2/\text{s}]$, no CGS sua unidade é o Stoke [St] sendo $1,0 \text{ St} = 10 \text{ m}^2/\text{s}$. Já a viscosidade dinâmica tem no SI sua unidade de medida representada em $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ e no CGS o Poise [P]; sendo $1,0 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$. É muito comum encontrar na literatura todas estas unidades expressas em termos de seus submúltiplos.

As viscosidades cinemática e dinâmica se relacionam a partir da densidade do fluido:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.2)$$

Com v representando a viscosidade cinemática, τ a tensão de cisalhamento e ρ , a densidade do fluido. De modo geral a viscosidade cinemática de um fluido varia com a temperatura. No caso de um fluido lubrificante que pode conter em sua composição mais de um componente viscoso, como aditivos diversos, a dependência de v com a temperatura pode ser descrita pelo modelo de Chirinos (CHIRINOS; GONZALEZ; LAYRISSE, 1983):

$$\log[\log(v + 0,7)] = \sum_{i=1}^n W_i \log[\log(v_i + 0,7)] \quad (2.3)$$

Neste caso, W_i representa a concentração de cada uma das substâncias presentes, enquanto ν_i é a viscosidade cinemática de cada substância. A análise da viscosidade dinâmica de um fluido permite que seu comportamento seja avaliado através de um equipamento chamado reômetro. Um reômetro pode operar em dois tipos de regimes, o rotacional e o oscilatório, em diferentes geometrias (placa-placa, cone-placa e couete)(BARNES, 2000).

No regime rotacional são obtidas as curvas de fluxo $\tau(\dot{\gamma})$, as curvas de viscosidade $\eta(\dot{\gamma})$ e curvas de temperatura $\eta(T)$. No regime oscilatório, na maioria dos casos, são avaliados os ensaios dinâmicos: varreduras de amplitude (parâmetros viscoelásticos como função da amplitude de oscilação) e varreduras de frequência (parâmetros viscoelásticos como função da frequência da oscilação).

2.1 Classificação reológica dos fluidos.

Do ponto de vista do comportamento reológico, os fluidos são classificados em Newtonianos e não-Newtonianos.

2.1.1 Fluidos Newtonianos.

Um fluido Newtoniano é aquele cuja viscosidade não é influenciada pela mudança da taxa de cisalhamento. Estes fluidos respondem a taxas de cisalhamento proporcionalmente à tensão de cisalhamento, e o fator de proporção é justamente a sua viscosidade dinâmica, que tem caráter constante:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

As curvas de fluxo e viscosidade de um fluido Newtoniano são lineares, como ilustrado na figura 2.1. Os fluidos lubrificantes em geral são fluidos Newtonianos.

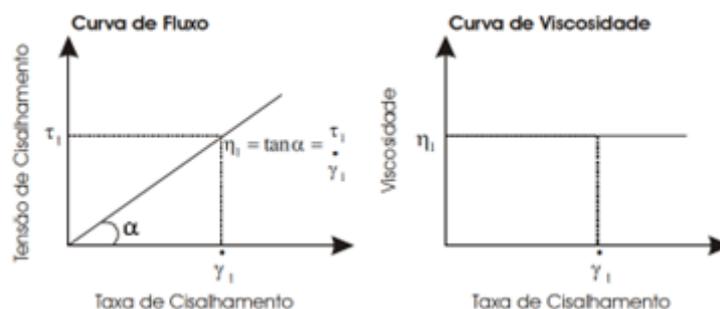


Figura 2.1: Curvas de fluxo e de viscosidade para um líquido Newtoniano.

2.1.2 Fluidos não-Newtonianos

Muitas substâncias líquidas consideradas homogêneas são de fato compostas de vários ingredientes: partículas de tamanho irregular, ou gotas de um líquido, são dispersas em outro líquido ou ainda soluções poliméricas com longas cadeias moleculares embaraçadas e entrelaçadas. O

conjunto de todos estes materiais exibe uma ordem interna irregular e, conseqüentemente, é caracterizada por uma resistência interna de intensidade considerável em oposição ao fluxo, isto é, pela viscosidade.

Com o aumento da taxa de cisalhamento, as partículas como palitos de fósforo em suspensão no líquido tendem a girar, alinhando-se na direção do fluxo. Vários tipos de cadeias moleculares dissolvidas em uma solução podem desembaralhar, estirando e orientando-se por conta própria, paralelas à força direcional. O alinhamento molecular (ou das partículas) permite que as moléculas (ou partículas) deslizem mais facilmente umas sobre as outras. Partículas em forma de esfera podem se deformar adquirindo a forma de um elipsóide. O cisalhamento pode também induzir a quebra das protuberâncias irregulares existentes em agregados de partículas, proporcionando que as partículas desagregadas fluam mais rapidamente através de uma dada tensão de cisalhamento (Figura 2.2).

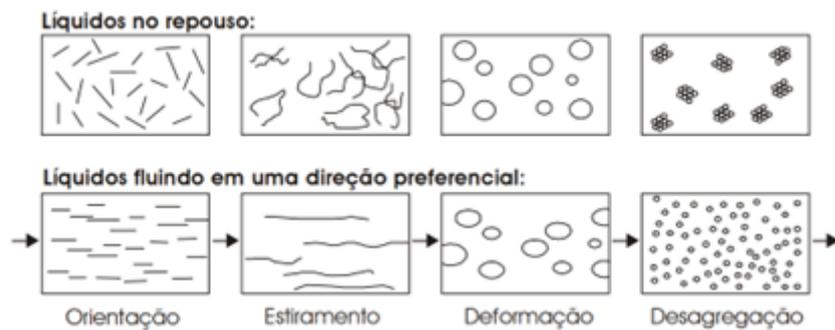


Figura 2.2: Dispersões em repouso e em fluxo produzido por uma tensão de cisalhamento.

Os fluidos não-Newtonianos são aqueles em que, devido aos processos tratados, a constante de proporcionalidade η descrita na equação 2.4 não é constante para qualquer valor de taxa de cisalhamento; nestes casos ela varia com $\dot{\gamma}$. Ao tratar destes fluidos, a ideia de viscosidade absoluta deixa de ter sentido, torna-se mais apropriado tratá-la como viscosidade aparente, dependente do valor da taxa de cisalhamento $\eta_{ap}(\dot{\gamma})$.

$$\eta_{ap}(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.5)$$

Os fluidos não-Newtonianos por sua vez são classificados dependentes e não dependentes do tempo. Os fluidos não dependentes do tempo são aqueles que experimentam uma variação de viscosidade decorrente da mudança da taxa de cisalhamento, porém, assim que a taxa de cisalhamento cessa, a viscosidade inicial volta ao patamar original. São exemplos deste tipo de fluidos os pseudoplásticos, os dilatantes e os plásticos.

- Em um fluido pseudoplástico os possíveis processos de orientação, estiramento, deformação e desagregação são responsáveis por fazer com que a viscosidade diminua em decorrência do aumento da taxa de cisalhamento. Com a diminuição da taxa de cisalhamento ocorre a reversão destes processos e o fluido volta a apresentar as características iniciais. A curvas de fluxo e viscosidade de um fluido pseudoplástico são representadas pela curva 2 da figura 2.3.

- Em um fluido dilatante a viscosidade aparente aumenta acompanhando a taxa de cisalhamento (curva 3 da figura 2.3). Em outras palavras, quando tentamos aumentar a velocidade de revestimento para alguns tipos de PVC, o material torna-se mais duro. A resistência do material torna-se mais espessa, a ponto de a estrutura vir a trincar.
- O comportamento reológico de um fluido plástico pode ser descrito de forma equivalente ao de um fluido pseudoplástico, mas com uma característica especial: a “tensão limite”. Eles são geralmente dispersões que durante o repouso podem assumir uma configuração em rede, devido às suas forças de ligação intermoleculares/interparticulares (forças polares, forças de Van Der Waals, etc.). Estas forças são capazes de restringir possíveis mudanças posicionais de seus elementos de volume dando à substância a característica de um corpo sólido, com uma viscosidade infinita elevada ¹. Se as forças externas que atuarem sobre ele, devido à tensão de cisalhamento, forem menores que as forças que dão forma à rede, estas tenderão a deformar tais substâncias sólidas elasticamente. Somente quando estas forças externas forem intensas o suficiente para superar as interações intermoleculares do sistema – ultrapassar o limite de tensão de cisalhamento chamado de “tensão limite” - então a rede colapsa, e seus elementos de volume poderão mudar de posição irreversivelmente: as substâncias sólidas transformam-se em líquidos fluentes, apresentando uma diminuição em sua viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, ou seja, apresentam diluição de cisalhamento (curva 4 da figura 2.3).

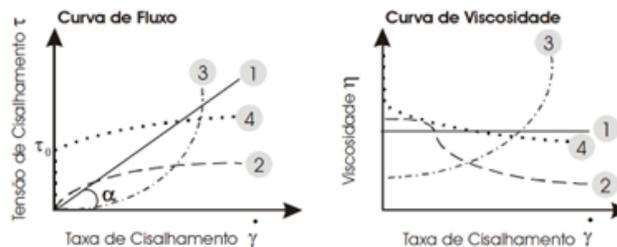


Figura 2.3: Vários tipos de comportamento de fluxo: (1) Newtoniano, (2) pseudoplástico, (3) dilatante e (4) plástico.

Os fluidos dependentes do tempo são aqueles que após o repouso alcançado não recuperam a viscosidade inicial. São exemplos de fluidos dependentes do tempo os tixotrópicos e os reopéticos. Em fluidos tixotrópicos, a viscosidade diminui devido ao aumento da taxa de cisalhamento, porém eles não recuperam sua viscosidade inicial após o repouso (ou este processo demanda um período maior para ocorrer). Os géis são exemplos de fluidos tixotrópicos.

Em fluidos reopéticos, a viscosidade aumenta devido ao aumento da taxa de cisalhamento, porém eles não recuperam sua viscosidade inicial após o repouso. Uma mistura de resina epóxi e seu catalizador é um exemplo de um fluido reopético.

¹O termo viscosidade infinita é o termo utilizado para descrever a viscosidade de um fluidos plástico para taxas de cisalhamento extremamente pequenas, próximas do repouso

2.1.3 Viscoelasticidade.

Em um fluido não-Newtoniano, durante a deformação, parte da energia proveniente da tensão de cisalhamento é dissipada na forma de calor, e parte pode ser armazenada elasticamente nos processos de orientação, estiramento, deformação e desagregação. Isto é um comportamento típico para muitas dispersões em que mostram não somente este potencial para orientação, mas também uma interação molecular/partícula dependente do tempo. A capacidade de armazenar parte da energia deformante é denominada viscoelasticidade. Fluidos reais podem ser mais ou menos viscoelásticos. Os fluidos cuja resposta elástica supera a plástica são denominados viscoelásticos., enquanto fluidos cuja resposta viscosa supera a resposta elástica são denominados viscoplásticos.

Em um ensaio rotacional, o estímulo é aplicado continuamente, impossibilitando que a resposta elástica do material possa ser avaliada. Em um ensaio oscilatório, por sua vez, o fluido é estimulado a fluir devido a ação de uma tensão de cisalhamento periódica do tipo:

$$\tau(t) = \tau_0 \text{sen}(\omega t) \quad (2.6)$$

Onde τ_0 é a amplitude da tensão e ω é a frequência angular com que o estímulo é aplicado. Na presença deste estímulo a amostra é deformada também periodicamente:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen}(\omega t - \delta) \quad (2.7)$$

A relação de fase (δ) entre a tensão aplicada e a respectiva deformação observada descreve o tipo de resposta viscoelástica do material. Se o fluido de teste se comportar como um sólido elástico ideal, a tensão aplicada e a deformação estarão em fase e $\delta = 0^\circ$. Se o fluido de teste se comportar como um fluido viscoso ideal, a tensão aplicada e a deformação estarão defasadas de $\delta = 90^\circ$. Um fluido real não se comporta como um sólido ou um líquido ideal, logo $0^\circ < \delta < 90^\circ$. Desse modo, a constante de fase permite verificar se o comportamento do fluido estudado tende a ser mais viscoso ou elástico.

Dentro desse contexto, a resistência total que um fluido real exibe em resposta às forças de cisalhamento pode ser separada em duas partes, uma de natureza viscosa e a outra de natureza elástica. Seguindo este raciocínio, é interessante separar as contribuições de cada uma das naturezas presentes na viscoelasticidade (SCHRAMM et al., 1994; CASSU; FELISBERTI, 2005; OLIVEIRA, 2013; JR et al., 2004; AKCELUD, 2006).

Desenvolvendo a equação 2.7 que descreve deformação, se obtém:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \text{sen}(\omega t) \cos \delta - \gamma_0 \cos(\omega t) \text{sen} \delta \quad (2.8)$$

A partir da equação 2.8, é possível analisar os casos limite de δ , visto que ele está delimitado no intervalo $0^\circ < \delta < 90^\circ$.

Se $\delta = 0^\circ$ a equação 2.8 se reduz a:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (2.9)$$

Porém se $\delta = 90^\circ$, a equação 2.8 se reduz para:

$$\gamma(t) = -\gamma_0 \cos(\omega t) \quad (2.10)$$

O que está de acordo com o exposto anteriormente. Não havendo atraso, a amostra será deformada em sincronia com a tensão aplica, como em um sólido ideal. Caso a defasagem seja máxima, o comportamento será equivalente ao de um líquido ideal, isso ocorre porque em uma amostra viscosa a tensão é proporcional à derivada da deformação em relação ao tempo, resultando assim em uma função do tipo $\cos(\omega t)$ (SCHRAMM et al., 1994; CASSU; FELISBERTI, 2005; OLIVEIRA, 2013; JR et al., 2004; AKCELRUD, 2006).

Fundamentados na análise prévia dos limites de δ , é possível afirmar que os componentes viscoso e elástico estão presentes na resistência total da amostra. Em se tratando de processos periódicos podemos fazer uso da matemática complexa para definir a resistência total da amostra (G^*) em termos da razão entre módulo da razão complexa (τ^*) pela deformação complexa (γ^*):

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} \quad (2.11)$$

Tendo em vista que sempre pode-se escrever oscilações através de uma exponencial complexa, (G^*) apresentará uma parte real e outra imaginária, que por sua vez pode ser escrita da seguinte forma:

$$G^* = G' + iG'' \quad (2.12)$$

O termo (G^*) também pode ser escrito na forma polar, apenas trocando a fase δ que antes estava em $\gamma(t)$ para $\tau(t)$, e tendo em vista que o atraso na deformação é equivalente ao adiantamento da tensão, logo:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = \frac{\tau_0 e^{i\omega t} e^{i\delta}}{\gamma_0 e^{i\omega t}} \quad (2.13)$$

A aplicação da relação de Euler resulta em:

$$G^* = \frac{\tau_0 e^{i\delta}}{\gamma_0} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} (\cos(\delta) + i \operatorname{sen}(\delta)) \quad (2.14)$$

Ao compararação da forma polar com a forma algébrica, explícita:

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos(\delta) \quad e \quad G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \operatorname{sen}(\delta) \quad (2.15)$$

Analisando de forma qualitativa, quando $\delta = 0^\circ$, $G^* = G'$, ou seja, quando não há defasagem a única contribuição na resistência do material se restringe à G' . Dessa forma, quando não há defasagem, o comportamento é puramente elástico. Devido a isso, é consistente associar G' ao armazenamento da energia adquirida no cisalhamento, que será recuperada posteriormente. A partir desse argumento, G' recebe o nome de módulo de armazenamento elástico (SCHRAMM et al., 1994; CASSU; FELISBERTI, 2005; OLIVEIRA, 2013; JR et al., 2004; AKCELRUD,

2006).

Sendo G' referente ao módulo elástico, torna-se intuitivo associar G'' à parte viscosa, já que a soma dos dois compõem G^* . Tal raciocínio não está errado. Quando $\delta = 90^\circ$, $G'' = G^*$, ou seja, quando a defasagem é máxima, apenas G'' será o responsável pelo comportamento puramente viscoso exibido, como esperado desde o início. Dessa forma G'' recebe o nome de módulo de perda, isso se deve ao fato de que quando um fluido é puramente viscoso e escoar, a energia usada no escoamento é degradada, pois as forças presentes nesse processo são forças de atrito, que posteriormente serão convertidas em calor, aumentando a entropia e impossibilitando sua recuperação, logo, essa energia é dada como “perdida” (SCHRAMM et al., 1994; CASSU; FELISBERTI, 2005; OLIVEIRA, 2013; JR et al., 2004; AKCELRUD, 2006).

As partes móveis do maquinário presente em um sistema de transmissão precisam ser lubrificadas devidamente com fluidos cuja viscosidade não permita o contato direto entre as diferentes peças metálicas, mas que, ao mesmo tempo, reduza perdas de energia por atrito e consequentes efeitos de desgaste. Por este motivo variações e inconstâncias de viscosidade não são bem aceitas, muito menos desejáveis, no contexto de lubrificantes em transmissões automáticas, logo, estes fluidos precisam ter um comportamento reológico Newtoniano. Um fluido newtoniano tem um comportamento reológico essencialmente viscoso, dessa forma a resposta elástica é extremamente pequena. Entretanto é importante destacar que durante sua utilização nos sistemas de transmissão estes fluidos tendem a ser degradados pela presença de contaminantes como a água, e pela oxidação do óleo e seus aditivos. Fatores que tem o potencial de modificar o comportamento reológico dos lubrificantes. Este comportamento tende a se intensificar com o tempo de utilização destes fluidos.

2.2 Índice de viscosidade.

Como descrito no início deste capítulo, um fluido de transmissão tem sua viscosidade diminuída em decorrência do aumento da temperatura. A depender da natureza do lubrificante, bem como, do tipo de aditivo que a ele é incorporado, as mudanças de viscosidade conforme a temperatura tem magnitudes diferentes. Dentro deste contexto a indústria automotiva, avalia a sensibilidade de um lubrificante à variação de temperatura a partir do índice de viscosidade (IV). Criado por Dan e Davis em 1929, trata-se de um número adimensional, baseado em uma escala empírica na qual foram atribuídos a padrões de óleos obtidos nos Estados Unidos os valores arbitrários IV iguais a 100 (H) e a 0 (L), conforme descrito na equação 2.16:

$$IV = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \quad (2.16)$$

Em que:

- L é a viscosidade cinemática do óleo em que foi arbitrado com $IV=0$, medida a $40,0^\circ\text{C}$;
- U é a viscosidade cinemática do óleo em análise, medida a $40,0^\circ\text{C}$;
- H é a viscosidade cinemática do óleo em que foi arbitrado com $IV=100$, medida a $40,0^\circ\text{C}$.

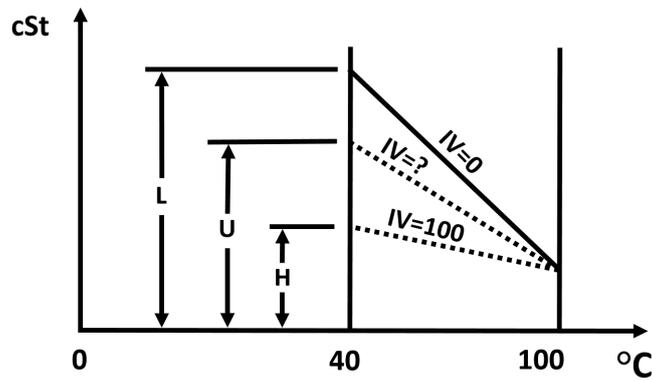


Figura 2.4: Representação gráfica do cálculo do índice de viscosidade. Adaptado de (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

A escolha dos dois óleos de referência, embora arbitrária deve obedecer a condição de que, quando medidos a $100,0^{\circ}C$, os três óleos tenham igual viscosidade cinemática.

As indesejáveis variações de viscosidades serão maiores quanto menor for o IV de um lubrificante. Em veículos automotores, a indicação do índice de viscosidade é dada pela agência americana SAE (*Society of Automotive Engineers*), na forma de uma combinação de valores associados a aproximações de suas viscosidades cinemáticas a altas e baixas temperaturas, na forma "XXwXX", como os lubrificantes 20w50 ou 15w40.

Capítulo 3

Princípios de funcionamento de uma transmissão automática típica.

As transmissões automáticas modernas se beneficiam de alguns sistemas característicos, não encontrados nas transmissões manuais, como os conversores de torque e os conjuntos de engrenagens planetárias. A magnitude das forças experimentadas pelo fluido dentro da transmissão, juntamente à seleção de funções que precisa desempenhar definem as propriedades alvo na fabricação dos ATF's, por isso é de interesse deste capítulo expor os princípios mais fundamentais de funcionamento das transmissões automáticas.

3.1 Engrenagens planetárias.

Esta é a substituta das engrenagens convencionais encontradas nas transmissões manuais, a figura 3.1 exibe um exemplo de engrenagem planetária, composta por uma engrenagem solar ao centro, acompanhada de planetárias propriamente ditas, todas envolvidas por uma engrenagem anelar que mantém o conjunto unido. Uma destas engrenagens é ligada ao conversor de torque e transfere movimento às demais, de forma que, caso uma das outras duas partes tenha sua rotação impedida, a terceira receberá torque com uma relação definida pelo tamanho das engrenagens envolvidas, conforme descrito por (KAHRAMAN, 1994). Esse impedimento é atingido através de um sistema de embreagens denominados pacotes de embreagens, controladas por atuadores hidráulicos segundo comando eletrônico ou, em transmissões mais antigas, por um delicado sistema de pressão de óleo. Cada conjunto de engrenagens planetárias é capaz de produzir até quatro relações de marcha diferentes, das quais, duas seguem o sentido de rotação do motor e outras duas, o sentido oposto, contudo duas destas relações, uma de cada sentido, não são utilizáveis por representarem relações de marcha que levariam o motor a velocidades não suportadas ou ainda relações para as quais o torque produzido pelo motor seria incapaz de mover o veículo.

Historicamente, transmissões com mais relações de marcha se tornaram a tendência entre os fabricantes, neste sentido, as múltiplas velocidades são produzidas acoplando conjuntos de engrenagens planetárias em uma mesma transmissão, sendo possível aplicar diferentes pacotes de embreagens simultaneamente para produzir a relação desejada, impedindo ou permitindo

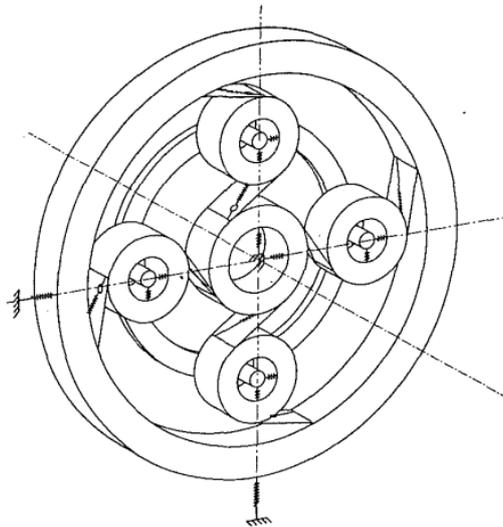


Figura 3.1: Exemplo de um conjunto de engrenagem planetária. (KAHRAMAN, 1994)

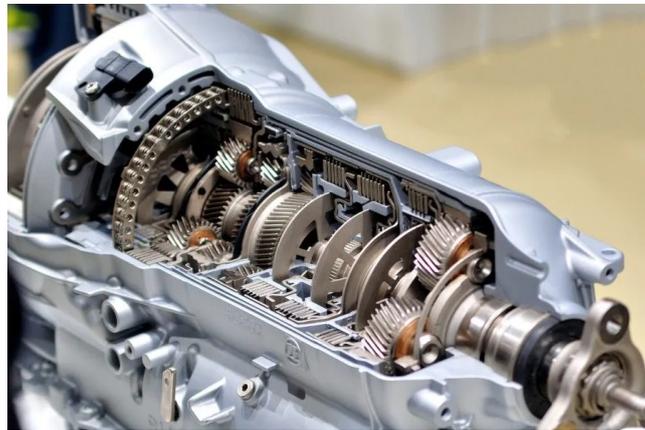


Figura 3.2: Exemplo de transmissão automática comum. (THE... , 2023)

a movimentação de engrenagens solares, planetárias ou anelares, conforme a necessidade, tornando possível obter as várias relações de marcha que permitem eficiência energética e conforto ao dirigir.

3.2 Conversor de torque.

Parte essencial das transmissões automáticas, cujo vagaroso surgimento perdurou muitos anos, é o conversor de torque, responsável por transmitir o torque do motor para a transmissão sem aplicação de uma embreagem a disco convencional, um processo denominado acoplamento hidráulico. Seu modo de operação se assemelha a duas turbinas voltadas uma para a outra, que possibilitam fluxo do fluido lubrificante agindo como fluido hidráulico e removedor de calor. Uma conexão entre o motor e a transmissão é, então, estabelecida dentro do conversor, produzindo grandes quantidades de calor uma vez que as turbinas não giram, necessariamente, à mesma velocidade, esse fenômeno provoca ineficiências e grande consumo de combustível, razão pela qual, na década de 1970, muitos fabricantes incluíram embreagens especiais aos

conversores de torque, capazes de ligar fisicamente os rotores a partir de certas velocidades angulares, eliminando a diferença nas velocidades de rotação.

3.3 Pacotes de embreagem.

Os referidos pacotes de de embreagens (figura 3.3) são lubrificados pelo mesmo fluido que realiza função hidráulica e de condutor térmico, justificando assim a necessidade de modificadores de atrito (INGRAM et al., 2010b), além de aditivos anti-desgaste. Em geral, os pacotes consistem de discos alternados de fibra ou outros compostos e materiais metálicos controlados por válvulas solenoides e pistões hidráulicos cujos posicionamentos e acionamentos, bem como construção variam entre cada transmissão.



Figura 3.3: Exemplo de pacote de embreagens comum. (FTI... , 2023)

Naturalmente, espera-se que uma transmissão automática seja capaz não apenas de realizar trocas de marcha, mas também de fazê-lo de maneira suave e eficiente. Para tanto, é necessário executar as mudanças nos momentos apropriados, isto é, avaliando as condições ambientes e as demandas de torque e potência, a fim de selecionar as velocidades mais adequadas a cada situação. Os trabalhos de (OHNISHI et al., 2000) demonstram como é feita a seleção de marchas em um dos casos que exigem maior precisão das transmissões, um plano inclinado.

Nesta situação, eletronicamente, o torque necessário para superar a inclinação e, portanto, a relação de marcha adequada, considerando ainda a carga do motor, é encontrado em alguns sistemas, a partir dos dados coletados via sensor de inclinação e acelerômetro. A aceleração resultante da soma da aceleração do veículo e da componente paralela à estrada da aceleração gravitacional, compõem a equação 3.1, cuja solução aproximada para θ é a inclinação da estrada.

$$a_{sen} = a + g \cdot sen(\theta)$$
$$\theta \approx sen(\theta) = \frac{a_{sen} - a}{g} \quad (3.1)$$

3.4 Transmissões automatizadas e continuamente variáveis.

Comumente se confundem as transmissões automáticas e as automatizadas. Brevemente, transmissões automatizadas se resumem a transmissões manuais ligadas a um artefato mecatrônico capaz de realizar as trocas de marchas via atuadores hidráulicos, tal aparelho é



Figura 3.4: Exemplo de transmissão continuamente variável.

frequentemente referido como um robô.

Uma solução inteligente, capaz de manter o motor girando em rotação ideal para grande economia de combustível, enquanto gerencia a velocidade do veículo, é a transmissão continuamente variável (CVT), que utiliza um sistema de polias com tamanhos variáveis conectadas por uma correia metálica de grande resistência (figura 3.4). Enquanto a polia de entrada recebe rotação do motor e a transfere para a polia de saída, os diâmetros de ambas são ajustados eletronicamente para criar relações de marcha virtualmente infinitas e manter a faixa de torque ideal para o motor. Este sistema demonstra grande eficiência, contudo, o fluido lubrificante envolvido é submetido a temperaturas e pressões muito superiores às que experimentaria em transmissões automáticas convencionais, capazes de elevar a viscosidade dinâmica do fluido em várias ordens de grandeza (TUNG; MCMILLAN, 2004).

Todos esses componentes são ajustados em termos de dimensões, temperaturas de trabalho, velocidade e demais especificações, exigindo fluidos especializados. Tais especificações são referidas como as propriedades do fluido, que serão tema do capítulo 4, a seguir.

Capítulo 4

Propriedades.

O rigor com que os ATF's eram avaliados evoluiu conforme o passar dos anos e das necessidades do mercado consumidor, tornando-os adequados para uso nas mais diversas regiões do globo e condições de trabalho. Para isso, a indústria química desenvolveu maneiras de dopar o fluido para produzir lubrificantes que atendam às especificações de cada transmissão (KEMP; LINDEN, 1990). Assim, conhecer as propriedades que os ATF's possuem é importante pois direciona o desenvolvimento novos fluidos mais capazes e eficientes.

4.1 Viscosidade.

O capítulo 2 explorou em maiores detalhes o fenômeno da viscosidade, no entanto, vale ressaltar as aplicações práticas no contexto dos fluidos de transmissão automática. Especificamente, a viscosidade cinemática, definida como a razão entre a viscosidade absoluta ou dinâmica, e a densidade do fluido, frequentemente expressa nas unidades de Stokes (St), apresenta uma relação com a variação de temperatura que segue a equação 2.3 (CHIRINOS; GONZALEZ; LAYRISSE, 1983). Outro parâmetro de grande influência na viscosidade é a pressão cuja ação faz crescer exponencialmente a viscosidade, especialmente caso o óleo base seja mineral. A dependência da viscosidade com a pressão é aproximada pela equação 4.1:

$$\eta(t, P) = \eta(t, 0) \cdot e^{\alpha P} \quad (4.1)$$

Na qual η é a viscosidade dinâmica, P é a pressão e α simboliza o coeficiente de viscosidade-pressão.

4.2 Ponto de fluidez.

Ao experimentar uma diminuição na temperatura, a partir de certo ponto, o lubrificante deixa de fluir, inviabilizando os processos de lubrificação. A composição química do óleo base, discutida no capítulo 6, empregado na fabricação do ATF tem grande influência sobre esta propriedade. Além disso, a carga aditiva contém moléculas chamadas PPD (*Pour Point Depressants* ou diminuidores de ponto de fluidez), cuja função é justamente reduzir a temperatura

mínima em que o lubrificante continua fluindo.

Índice de viscosidade.

Como definido no capítulo 2, o índice de viscosidade é uma medida arbitrária que mensura o grau de variação da viscosidade de um fluido conforme as variações de temperatura. Ao longo das décadas, algumas das maiores revoluções em termos de lubrificantes foram relacionadas à capacidade da indústria de produzir óleos base com maiores índices de viscosidade (BROMBERGS, 1987; MANG; LINGG, 2017). Em geral, fluidos sintéticos se destacam por seus índices de viscosidade devido à homogeneidade de sua composição química.

4.3 Gravidade específica.

A gravidade específica é definida como a razão entre a massa de um dado volume de fluido e a massa de um volume igual de água a 15,6°C . Esta quantidade é utilizada majoritariamente como parâmetro para definir outras propriedades. Uma vez que há um aumento no volume, acompanhando o aumento de temperatura, a gravidade específica tende a diminuir. Comumente, a gravidade específica de um ATF é referida como "gravidade A.P.I", uma gradação que possui relação inversamente proporcional à gravidade específica usual e é definida pela equação 4.2:

$$API_g = \frac{141,5}{G_e} - 131,5 \quad (4.2)$$

Sendo a gravidade específica representada por G_e e a gravidade A.P.I, por API_g .

4.4 Volatilidade.

Dentro de transmissões automáticas, os lubrificantes são submetidos a altas temperaturas, nas quais a sua volatilidade passa a ser crítica. Ela está relacionada à concentração de substâncias de baixa massa molecular e é consideravelmente afetada pelo óleo base escolhido, tendo influência dos pacotes de aditivos empregados.

4.5 TAN e TBN.

Dada a inevitabilidade do desgaste do óleo lubrificante, é válido conhecer seus indicativos, neste sentido, os valores TBN (*Total Base Number* ou número de basicidade total) e TAN (*Total Acid Number* ou número de acidez total) são apropriados pois quantificam, em miligramas de hidróxido de potássio por grama de fluido, segundo os padrões ASTM D2896 e ASTM D664/974, a capacidade de neutralização do PH por parte dos aditivos presentes, geralmente antidesgaste e de pressão extrema, contendo sulfonatos de cálcio, magnésio ou bário.

4.6 Densidade.

Esta propriedade é altamente influenciada pela composição do óleo base e sofre influência direta das alterações de volume do ATF, observadas com particular sensibilidade conforme variações de temperatura. A densidade de um ATF tipicamente decai com a temperatura (NEWCOMB; TIPTON; JAO, 2007).

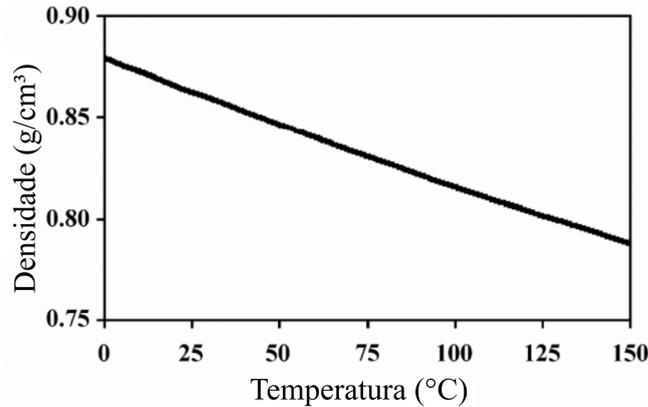


Figura 4.1: Comportamento da densidade de um ATF variando a temperatura. Adaptado de (NEWCOMB; TIPTON; JAO, 2007)

4.7 Calor específico e coeficiente de expansão térmica.

Razão entre a quantidade de calor requerida para elevar em uma unidade a temperatura de certa massa de fluido, e a quantidade de calor necessária para elevar em uma unidade a mesma massa de água. Juntamente com a condutividade térmica, esta quantidade determina a capacidade do fluido de agir como meio removedor de calor de dentro de uma transmissão automática, uma das funções mais importantes, que contribui para durabilidade da transmissão.

Representado pela letra α , o coeficiente de expansão térmica cresce linearmente com a temperatura (NEWCOMB; TIPTON; JAO, 2007) e acompanha as variações de volume do fluido, conforme a equação 4.3.

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \frac{\partial V}{\partial T} \quad (4.3)$$

Em que α é o coeficiente de expansão térmica, V_0 é o volume inicial do fluido e $\frac{\partial V}{\partial T}$ é a taxa de variação de volume com a temperatura.

4.8 Coeficiente de atrito.

Esta propriedade varia com grande amplitude conforme os requerimentos dos fabricantes das transmissões, o coeficiente de atrito é uma propriedade do sistema tribológico como um todo e deve ser suficientemente grande para permitir o bom funcionamento dos conjuntos de embreagens mas não pode comprometer outros sistemas (KEMP; LINDEN, 1990).

4.9 Módulo de compressibilidade

Esta grandeza mede a resistência que o fluido apresenta a uma diminuição de volume quando submetido a compressão (NEWCOMB; TIPTON; JAO, 2007). Seu recíproco, a compressibilidade, é a medida da tendência do fluido a sofrer compressão. Há duas definições aceitas para o módulo de compressibilidade, apresentadas nas equações 4.4 e 4.5, são chamados módulo secante e tangente.

$$B_{ms} = V_0 \frac{P - P_0}{V_0 - V} \quad (4.4)$$

$$B_{mt} = -V_0 \frac{\partial P}{\partial V} \quad (4.5)$$

Em que B_{ms} e B_{mt} representam os módulos de compressibilidade secante e tangente, respectivamente, enquanto P e V são a pressão e volume atuais. Conforme as especificações da transmissão, ATF's podem apresentar um leque consideravelmente maior e mais detalhado de propriedades em comparação com o que foi discutido nesse capítulo. Alguns exemplos que podem fazer parte da lista de requerimentos incluem a distribuição de faixa de ebulição, solubilidade, tensão superficial, resistividade elétrica, ponto de anilina, ponto de névoa, calor de vaporização, ponto de fulgor, miscibilidade, bombeabilidade e até mesmo a coloração (KEMP; LINDEN, 1990).

Uma vez apresentadas as propriedades básicas de um ATF, é preciso, também, conhecer os agentes responsáveis por elas, como anteriormente citados, os aditivos. Presentes em ampla variedade, essas substâncias, apesar de compartilharem algumas características, podem agir por mecanismos diferentes, assunto sobre o qual trata o capítulo 5 a seguir.

Capítulo 5

Aditivos.

Quanto à composição dos óleos aplicados a transmissões automáticas, a carga aditiva desempenha funções fundamentais desde corrigir as propriedades expostas no capítulo 4 a contribuir para o aumento da vida útil do fluido. Neste contexto, dada a maneira como são produzidos os ATF's, é pertinente estudar os diferentes aditivos usados para suprir estas necessidades e seus papéis como constituintes importantes do fluido, pela possibilidade que oferecem em aprimorar a longevidade do fluido e, potencialmente, reduzir custos de produção.

É comum que a quantidade dos aditivos some cerca de 10% de toda a massa do fluido, para corrigir e modificar os valores de suas diferentes propriedades a fim de atingir os níveis de desempenho designados pelos fabricantes das transmissões automáticas. Esta seção é dedicada a expor, os aditivos mais frequentemente selecionados para fluidos de transmissões automáticas. Segundo (TUERO et al., 2022) e (MINAMI, 2017) é frequente que empresas especializadas na produção de ATF's adquiram pacotes prontos de aditivos e se encarreguem unicamente de adicioná-los ao óleo base escolhido nas concentrações necessárias para atingir os níveis de especificidade dados pelos fabricantes de transmissões automáticas. Neste ramo, destacam-se empresas como AFTON e Lubrizol, que disponibilizam variados pacotes de aditivos especialmente projetados para que, quando adicionados a um óleo de qualidade, criem fluidos que atendam às especificações.

A gama de substâncias utilizadas como aditivos é ampla e, por esta razão, convém separá-la em grupos, representados na figura 5.1, onde estão organizados pelas funções que desempenham, mesmo que a maioria dos compostos realizem múltiplas funções simultaneamente em regimes de temperatura e pressão diferentes. A seleção de aditivos divide-se entre os que agem majoritariamente sobre o óleo base, e os que concentram sua ação nas superfícies em contato com o fluido.

5.1 Modificadores de viscosidade.

Dado que a viscosidade é uma das características mais importantes para um ATF, é vital que seja mantida dentro dos limites de aceitabilidade especificados pelo fabricante da transmissão, de modo que se faz necessária a adição de modificadores de viscosidade a fim de torná-los multigraduados (SARKAR et al., 2002) e, nas proporções adequadas, limitar as variações de

| Mecanismo de funcionamento | Local de funcionamento | | | | | |
|----------------------------|------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| | Superfície | | | Óleo base | | |
| Interações químicas | Pressão extrema | Antidesgaste | Melhoradores de atrito | Inibidores de ferrugem | Anti-oxidantes | Detergentes |
| Interações físicas | Dispersantes | Anti-espumantes | Desemulsificantes | | Diminuidores de ponto de fluidez | Modificadores de viscosidade |
| Âmbito de atuação | Tribológico | | Perpetuadores | Reológico | | |

Figura 5.1: Divisão simplificada dos grupos de aditivos empregados em ATF's. Adaptado de (MINAMI, 2017)

viscosidade decorrentes de alterações na pressão e temperatura locais. Tais aditivos são polímeros de grande massa molecular que, essencialmente, permanecem “enrolados” a baixas temperaturas e se desenrolam em altas temperaturas, interagindo com uma porção maior de óleo base e, portanto, aumentando sua viscosidade. Alguns compostos frequentemente usados como modificadores de viscosidades são copolímeros de olefina (OCP's), polimetacrilatos (PMA), *hydrogenated styrene-diene* (STD) e *styrene polyesters* (STPE) (GHOSH et al., 1998). Assim como discutido no capítulo 2 a pressões e tensões extremas, é preferível que a viscosidade do fluido seja maior, enquanto regimes mais amenos exigem uma menor viscosidade a fim de que o ATF seja capaz de oferecer a lubrificação e proteção adequadas (INGRAM et al., 2010b).

5.2 Diminuidores de ponto de fluidez.

A perda de fluidez tem sua origem na cristalização de parafínicos dentro do fluido, a baixas temperaturas, esse ponto pode ser alterado a fim de evitar a cristalização via aditivos PPD ou diminuidores de ponto de fluidez. Essencialmente, os diminuidores de ponto de fluidez se apresentam como grandes cadeias carbônicas a base de polimetacrilato, similares aos modificadores de viscosidade, e atuam separando os cristais de parafina, evitando que formem estruturas maiores e comprometam a fluidez do lubrificante.

Ambos, os modificadores de viscosidade e os diminuidores de ponto de fluidez, atuam diretamente sobre as propriedades reológicas dos ATF's, de maneira puramente física e apresentam-se como polímeros de alta massa molecular em comparação aos demais aditivos.

5.3 Modificadores de atrito.

As referidas superfícies metálicas estão inevitavelmente revestidas de contaminantes ou mesmo óxidos que podem ser removidos com o atrito, expondo-as e permitindo a adsorção pelos modificadores de atrito, fenômeno que provoca a formação de sais inorgânicos (NEWCOMB; TIPTON; JAO, 2007). As asperezas e seus efeitos podem ser efetivamente reduzidos via modificadores de atrito. Por conseguinte, estes são responsáveis por alterar o coeficiente de atrito do sistema de embreagens e nas superfícies metálicas em que adere, e são compostos, em sua maioria, por aminas, ácidos graxos, álcoois, ésteres e amidas.. Substancialmente, estes aditivos atuam no âmbito tribológico dos ATF's. Sua natureza anfífila lhes permite realizar ligações físicas com superfícies metálicas.

5.4 Agentes de pressão extrema e anti-desgaste.

Ensaio tribológicos revelam que, em condições severas, geralmente dentro do regime de lubrificação limítrofe, o desgaste ocasionado pelo fricção das superfícies pode ser minimizado pela ação de moléculas denominadas de aditivos de pressão extrema, ou "*extreme pressure agents*".

Estes compreendem outra das mais importantes categorias de aditivos no quesito de perpetuação do fluido. Quando ativados, a certas condições de temperatura e pressão, agem criando uma camada protetora, sacrificada durante o regime de lubrificação limítrofe. O representante mais comumente encontrado destes aditivos é o ZDDP, Ditiófosfato de zinco (NEWCOMB; TIPTON; JAO, 2007).

5.5 Antioxidantes.

Inevitavelmente, as altas temperaturas no interior das transmissões automáticas provocam oxidação do fluido, processo marcado pela criação de radicais livres. Antioxidantes somam ao fluido a capacidade de neutralizar esses radicais livres, impedindo-os de acelerar a degradação. Diferentes agentes antioxidantes são adicionados a fim de desabilitar diferentes radicais por meio de reações químicas simples que envolvem muitas vezes uma mudança na prioridade da oxidação, formando produtos menos prejudiciais.

5.6 Detergentes e dispersantes.

Similares em princípio aos detergentes convencionais, estes aditivos promovem a extração e eliminação de detritos indesejáveis suspensos no ATF, via agregação na superfície dos mesmos, o que lhes permite conduzir as partículas aos filtros. Sendo, portanto, surfactantes, os detergentes são aditivos de baixa emulsividade capazes de neutralizar ácidos e limpar superfícies metálicas, por quem são atraídas graças à polaridade dessas moléculas. O processo de remoção das impurezas se aproveita do sistema de filtração da transmissão, em que o óleo carregando partículas indesejadas suspensas por meio dos detergentes passa pelo filtro de óleo, eliminando

estas partículas.. De modo semelhante, os dispersantes são adicionados com a finalidade única de suspender e desabilitar os agregados inconvenientes até que seja efetuada a substituição do óleo. Apesar das semelhanças entre os detergentes e dispersantes, eles apresentam diferenças notáveis, como o peso molecular e o processo de obtenção além, é claro, das formas de atuação.

5.7 Antiespumantes e desemulsificantes.

Caso pequenos volumes de ar adentrem o fluido lubrificante, a viscosidade local torna-se instável e o processo de oxidação pode ser acelerado por razão da maior área superficial com a qual o fluido pode interagir, neste ponto os aditivos anti-espumantes são particularmente úteis pois são capazes de promover a união das pequenas bolhas de ar, fazendo aumentar o empuxo que estas experimentam e facilitando assim, que elas sejam levadas à superfície do fluido e se desfaçam.

Análogo ao caso das bolhas de ar, diversos surfactantes presentes no ATF promovem o surgimento de aglomerados de água, gotículas, naturalmente prejudiciais às propriedades reológicas do fluido. As emulsões de água em óleo são desfeitas via aditivos desemulsificantes na medida em que estes inibem a ação dos surfactantes que permitem a formação dessas estruturas, eles evidenciam a competição entre os aditivos com, no caso, a moderação da ação dos antiespumantes.

5.8 Inibidores de ferrugem e desativadores de metais.

Ambos estes aditivos concentram suas ações na prevenção de oxidação provocada por ar ou ácidos no fluido. Os inibidores categorizados como neutralizadores são responsáveis por neutralizar os ácidos provenientes da inevitável oxidação do próprio ATF. Por outro lado, os inibidores categorizados como formadores de filme protetor, evitam a corrosão das superfícies na medida em que minimizam o seu contato via formação de uma camada protetora. Estes aditivos se mantêm ativos a temperaturas relativamente baixas.

Metais de transição, bem como ferro e cobre podem ser encontrados na forma de íons, suspensos no fluido e representam riscos à sua integridade no sentido oxidativo, mais especificamente, ferro e cobre iônicos, por exemplo, agem como catalisadores das reações de oxidação, reduzindo a energia necessária para tal. Com o objetivo de inibir os efeitos dos metais esporadicamente encontrados no ATF, desativadores de metais impedem os possíveis danos ocasionados ao capturar os íons, efetivamente negando suas ações.

Sob um olhar prático, a ampla variedade de aplicações para as quais os fluidos lubrificantes são produzidos requer uma extensa quantidade de testes e cuidados quanto à formulação do fluido. Uma das maiores preocupações no que diz respeito à formulação são as interações entre os aditivos, isto é, uma vez que os aditivos podem agir de maneiras antagônicas, as concentrações em que são adicionados e o processo de homogeneização são chave e devem ser aperfeiçoados. No contexto das transmissões automáticas, as baixas tolerâncias e a necessidade de criar ATF's duradouros exigem que os procedimentos de teste sejam abrangentes e levem

os fluidos aos extremos que experimentarão durante a operação nas transmissões reais. Por esta razão, muitas empresas levam os fluidos a teste em veículos reais avaliando sua eficiência e desgaste por meio de análises de amostras de fluido periodicamente retiradas.

Em suma, os aditivos aqui discutidos são adicionados a óleos base cuidadosamente escolhidos para produzir os fluidos de transmissão automática, processo semelhante à produção dos fluidos lubrificantes de motores. As características dos óleos base, como sua composição, fabricação, propriedades, além de nomenclatura e classificação são o assunto do capítulo 6 na sequência.

Capítulo 6

Óleos base - *basestock*.

Apesar das inúmeras especificidades variando para cada transmissão, os fluidos aplicados a transmissões automáticas são produzidos de maneira semelhante, adicionando pacotes de aditivos a um óleo base. Estes óleos formam o alicerce sobre o qual agem os aditivos em um lubrificante, influenciando consideravelmente o produto final, portanto, se faz necessário compreender os óleos base em sua fabricação, classificação e composição.

Historicamente, as exigências quanto aos óleos base se limitaram à sua viscosidade e concentração de componentes acídicos até a década de 1950, uma realidade que se viu insuficiente para acompanhar as demandas de um mercado que exigia maior qualidade, compatibilidade ambiental e menores riscos à saúde, todas características que se tornaram foco na produção de óleos base nas décadas seguintes. Um dos grandes marcos na história dos óleos base foi o estabelecimento da organização em 5 grupos, feita em 1993 pelo API, que se baseia nas propriedades físicas e químicas verificadas nos óleos, sendo eles de origem mineral ou sintética. Os processos relativos ao refinamento do petróleo bruto até o óleo base ganharam notoriedade e cresceram em complexidade, atualmente os óleos mais refinados são submetidos a uma ampla e complexa gama de processos a depender da qualidade do petróleo e do grau de refinamento que se pretende alcançar (MANG; LINGG, 2017), (CHAN et al., 2018).

Quanto à estrutura química desses óleos, absolutamente relevante para a compreensão das capacidades de um ATF, há quatro categorias nas quais, os hidrocarbonetos presentes são subdivididos, sendo os primeiros e mais comumente encontrados, os compostos parafínicos exclusivamente constituídos de carbono e hidrogênio e apresentando unicamente ligações simples em cadeias abertas, um exemplo desse tipo de composto é o hexano exibido na tabela 6.1. Caso a cadeia carbônica apresente uma ou mais ligações duplas, o composto recebe o nome de alceno, ou ainda, olefina e quando a cadeia formada por esses compostos é fechada, isto é, um ciclo, ele é denominado nafteno. Outro composto de grande relevância no âmbito dos ATF's são os aromáticos, todos representados na tabela 6.1.

6.1 Produção.

Óleos base minerais iniciam seu curso como petróleo extraído do subsolo por todo o globo, o segundo passo da produção é a separação por destilação, que aproveita a diferença de vo-

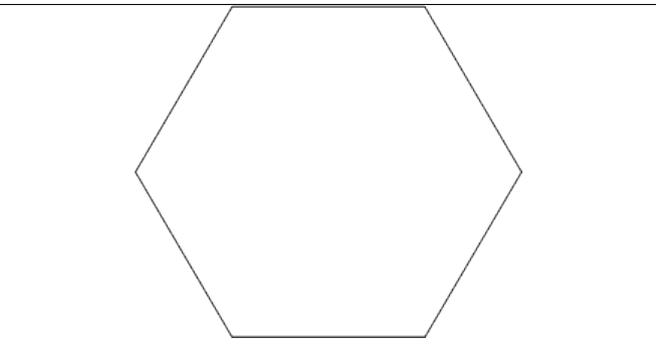
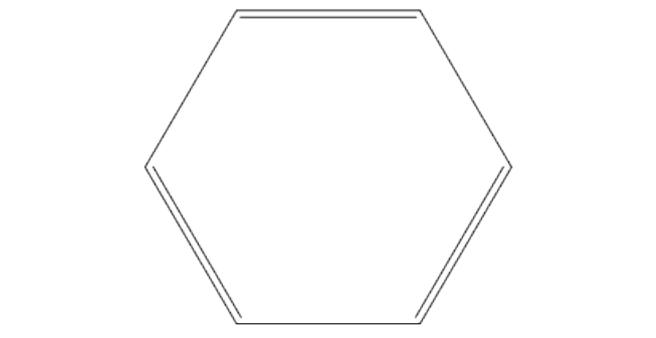
| | |
|---------|---|
| Hexano |  |
| Olefina |  |
| Nafteno |  |
| Benzeno |  |

Tabela 6.1: Hidrocarbonetos mais comuns encontrados nos óleos base.

latilidade entre os componentes presentes no petróleo para separá-los aplicando altas temperaturas (MANG; LINGG, 2017). A figura 6.1 exibe alguns dos compostos separados por este processo por faixa de temperatura e tamanho da cadeia: Nota-se que o aumento da massa molecular acompanha um crescimento na temperatura de ebulição. Mesmo sendo eficaz, a destilação à pressão atmosférica não é capaz de separar totalmente os compostos, por isso se faz necessário empregar a destilação a vácuo (entre 0,05 e 0,01 atm). Na sequência, os produtos da destilação a vácuo são levados à etapa de extração por solvente onde, em geral, são empregados furfural, NMP (1-Metil-2-pirrolidinona) ou fenol, com o intuito de remover substâncias indesejadas como aromáticos que comprometam o índice de viscosidade, estabilidade de oxidação ou que possam representar risco à saúde (MANG; LINGG, 2017). A próxima etapa é a desparafinação, em que a substância é resfriada até que a parafina presente se cristalice e possa ser retirada por filtração. Resta ainda submeter o óleo a uma série de processos classificados como “hydrofinishing” ou hidroacabamento, cujas etapas podem variar em quantidade e complexidade para gerar óleos base de diferentes grupos e propriedades (MANG; LINGG, 2017). Alguns possíveis processos empregados nesta etapa são apresentados na figura 6.2:

Óleos sintéticos.

Notoriamente, óleos de base sintética se mostram muito mais capazes de realizar muitas das tarefas a que são submetidos, por razão da sua composição molecular, em comparação

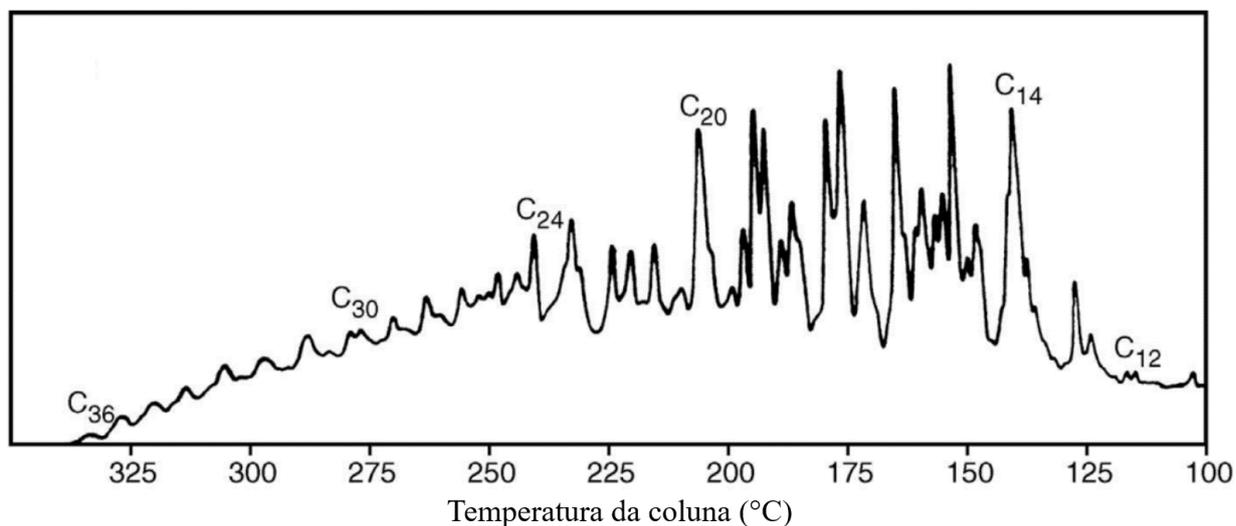


Figura 6.1: Compostos separados durante a destilação do petróleo bruto. Adaptado de (MANG; LINGG, 2017)

aos minerais. Há diferentes tipos de moléculas com as quais óleos base sintéticos podem ser construídos, sendo a mais comum, e por isso o foco nessa molécula, a chamada polialfaolefina (PAO). Antes, porém, vale conhecer o momento no tempo em que se estabeleceu a definição de óleo base sintético. Por volta do fim da década de 1980, os processos de refinamento do petróleo bruto na produção de óleos base haviam alcançado níveis de excelência que permitiam criar óleos cuja composição apresentava saturação e homogeneização tais que se assemelhavam a óleos puramente sintéticos. Especificamente, a fabricante de lubrificantes Castrol, produzia fluidos cuja base era derivada do petróleo bruto, porém altamente refinada lhe garantindo desempenho idêntico ao de óleos puramente sintéticos. Contrária a esta afirmação, a pioneira no uso de polialfaolefina na fabricação de óleos sintéticos, Mobil, contestava argumentando que esta não era a definição de uma base sintética verdadeira, e que afirmar isso seria desrespeitoso para com o consumidor. A esta contenda, coube a determinação de que, para fins comerciais, os óleos lubrificantes, aplicados a motores, transmissões ou maquinário em geral, podem ser chamados sintéticos baseando-se unicamente em seu desempenho, não em sua construção (WU; HO; LUO, 2017).

A molécula de polialfaolefina inicia seu curso com a polimerização de etileno em olefinas, com ligação dupla ocorrendo no primeiro carbono da cadeia, tal molécula é denominada α -olefina. Este complicado processo inclui a ação de catalizadores como trifluoreto de boro além de hidrogenação e de outras etapas a depender dos monômeros utilizados (DRESEL, 2017).

6.2 Classificação dos óleos base.

Os óleos base com os quais são produzidos os fluidos de transmissão automática, bem como óleo lubrificante para motores e outros óleos de aplicações diversas receberam uma classificação conforme suas características pelo *American Petroleum Institute* (API) em 1993 em 5 grupos distintos:

- Óleos de grupo I são fabricados desde a década de 1930 e fizeram parte importante da

história dos primeiros fluidos de transmissão automática. Por limitações tecnológicas e outros fatores, o grupo I é constituído de óleos refinados do petróleo bruto por uma sequência de procedimentos que incluem destilação atmosférica, afetando a viscosidade do produto final, destilação a vácuo, influenciando o índice de viscosidade e a estabilidade de oxidação, extração líquido-líquido, que afeta o ponto de fluidez e *Hydro finishing*. Esses óleos possuem uma concentração de hidrocarbonetos saturados inferior a 90% e concentração de enxofre superior a 0,03%, além de um índice de viscosidade que varia entre 80 e 120. A partir de 1960, a introdução da hidrodissulfuração melhorou a estabilidade, duração e reduziu a reatividade desse grupo (MANG; LINGG, 2017).

- Óleos de grupo II são fabricados desde 1971, a partir de um procedimento semelhante ao do grupo I, com a substituição do processo de Hydro finishing pelo “hidrocraqueamento” a alta pressão que reduz a massa molecular ao saturar anéis aromáticos e alcenos, e quebrar naftenos e parafinas. Esse grupo é definido como tendo uma concentração de hidrocarbonetos saturados superior a 90%, concentração de enxofre inferior a 0,03% e um índice de viscosidade entre 80 e 120 (MANG; LINGG, 2017).
- Óleos de grupo III se beneficiam da desparafinação catalítica, hidroisomerização e hidrotretamento desde 1993 para sua produção e são constituídos de moléculas com pesos muito próximos. Esse grupo apresenta concentração de hidrocarbonetos saturados superior a 90%, concentração de enxofre inferior a 0,03% e índices de viscosidade maiores que 120 (MANG; LINGG, 2017).
- Óleos de grupo IV constituem uma categoria diferente de óleos base desde 1974, por serem completamente sintéticos. Seus principais constituintes são polialfaolefinas (PAO) e isso lhes garante grande estabilidade oxidativa e baixo ponto de fluidez. É possível produzir óleos de grupo III refinados o suficiente para que se comportem como o grupo IV mas isto é comercialmente inviável. Óleos pertencentes a esse grupo são caracterizados com índice de viscosidade entre 125 e 200 (MANG; LINGG, 2017).
- O grupo V abarca todos os óleos que não se enquadram nas especificações dos grupos anteriores, desde polialquilenoglicol (PAG), naftaleno alquilado e ésteres sintéticos até óleos baseados em silício, sintéticos e minerais. Os índices de viscosidade desse grupo podem variar de 25 a 85 (MANG; LINGG, 2017).

6.3 Propriedades dos óleos base.

As propriedades que definem a qual grupo pertence cada óleo base são vitais pois determinarão o grau de aditivação necessário para que o ATF produzido atinja a especificação desejada para a aplicação. Dentre elas se encontram informações acerca da composição do óleo, bem como do seu comportamento no que diz respeito à sua viscosidade cinemática, ponto de fluidez e demais características. A seguir, são apresentadas algumas das propriedades mais relevantes a serem consideradas quanto à escolha do óleo base:

No quesito saturação, é preferível que o óleo base possua uma baixa concentração de hidrocarbonetos insaturados, ou seja, é desejável eliminar os anéis aromáticos puros presentes nas cadeias carbônicas por razão de diminuir a toxicidade da substância, além de aumentar a eficácia dos pacotes de aditivos. É comum encontrar moléculas contendo, simultaneamente, anéis aromáticos e enxofre, como: Tiofeno, Tiol, Benzotiofeno, Dibenzotiofenos, Dissulfetos, benzonaftotiofeno e Tetraidrotiofeno (tabela 6.2).

Baixas viscosidades reduzem a energia requerida para a movimentação de partes móveis e são necessárias para CCS (*cold crank start* ou partida a frio) no caso de motores e para promover a lubrificação exigida em transmissões automáticas. Viscosidades mais altas são preferíveis quando o maquinário se encontra em temperatura de trabalho, uma vez que oferecem maior proteção.

O índice de viscosidade, explorado no capítulo 2, é um dos fatores mais relevantes para a escolha do óleo base, sobretudo para os ATF's que se propõem a perdurar extensos períodos de serviço. A baixas temperaturas, a viscosidade dos óleos base tende a crescer, característica que se mantém mesmo após a aditivização, fenômeno verificado experimentalmente e descrito no capítulo 8.

Além destes, outros parâmetros são comumente utilizados na caracterização do óleo base, de acordo com (KEMP; LINDEN, 1990), como a “constante de viscosidade-gravidade” (VGC), cujo valor avaliado segundo o método ASTM D2501 indica a composição da maior fração de hidrocarbonetos presentes na substância. Ademais, o ponto de anilina, temperatura na qual, volumes iguais de anilina e do óleo tornam-se miscíveis, complementa o teste da VGC ao indicar a composição da substância. A caracterização via distribuição carbônica consiste em avaliar, com base no índice de refração, densidade e massa molecular, as concentrações de parafínicos, naftênicos e aromáticos, segundo ASTM D3238.

Seguindo o mesmo padrão, os métodos ASTM D2786-91 e D3239-91 permitem avaliar a presença de compostos contendo múltiplos anéis aromáticos, que recebem os nomes de monoaromáticos, diaromáticos, triaromáticos, tetra aromáticos, penta aromáticos, tiofenos e aqueles que não se encaixarem nas categorias anteriores são simplesmente não-identificados.

6.3.1 Influências dos óleos base nas propriedades do ATF.

Naturalmente, as propriedades do óleo base que compõem grande parte do fluido de transmissão automática tem influência direta no comportamento do produto final. Em particular, é desejável que as quantidades de aditivos necessários sejam diminuídas por razões comerciais e, neste sentido, óleos base com altos índices de viscosidade vêm sendo produzidos, com uma notável tendência a apresentar viscosidades relativamente menores a baixas temperaturas, próximas de -40°C .

Além disso, é necessário que o fluido de transmissão automática apresente boa compatibilidade com os elementos empregados na vedação do equipamento (ZENG, 2008), a fim de minimizar a possibilidade de vazamentos por danos a esses polímeros. É comum encontrar “polycrylate”, nitrila, silicone e fluorelastômeros constituindo elementos de vedação e estes comportam-se bem, mantendo sua integridade na presença de ATF's cujos óleos base compre-

endem compostos naftênicos ou aromáticos. Nesse contexto, compostos majoritariamente parafínicos ou mesmo PAO's apresentam desvantagem neste quesito pois demonstram tendências a promover enrijecimento ou ressecamento nas vedações. Por esta razão demandam aditivação com "seal swell agents", como ésteres, aromáticos e sulfonas

Outro fator que sofre grande impacto do óleo base escolhido é a estabilidade de oxidação, esta propriedade é determinante para a extensão da vida útil do fluido, dada a inevitabilidade do processo de oxidação. Em geral, compostos orgânicos aromáticos e insaturados apresentam menor estabilidade se comparados aos saturados, isto significa que óleos base de grupo IV e III tem vantagem neste quesito.

Quanto às perdas de viscosidade, naturalmente, óleos base com maior índice de viscosidade tem maior capacidade de manter a lubrificação eficiente dentro de uma transmissão, isto significa que será necessário adicionar menos polímeros de grande peso molecular, os modificadores de viscosidade.

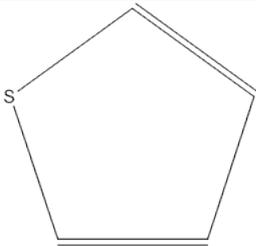
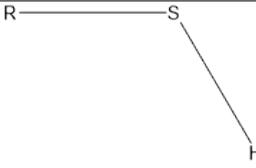
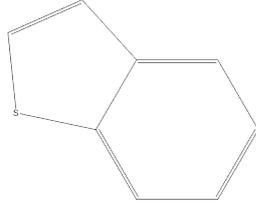
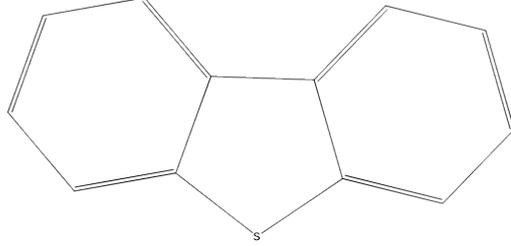
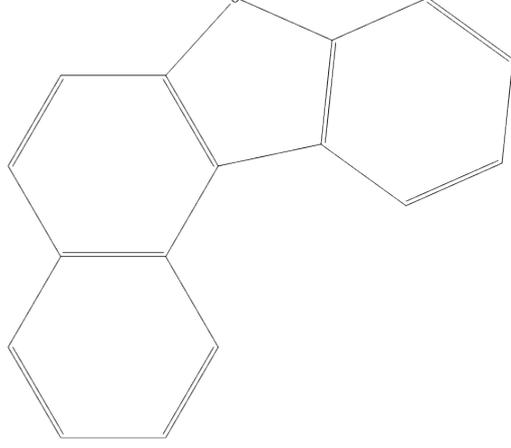
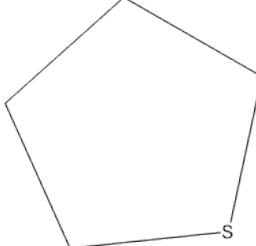
| | |
|-------------------|--|
| Tiofeno |  |
| Tiol |  |
| Benzotiofeno |  |
| Dibenzotiofeno |  |
| Dissulfeto |  |
| Benzonaftotiofeno |  |
| Tetraidrotiofeno |  |

Tabela 6.2: Compostos mais comuns contendo anéis aromáticos e enxofre encontrados nos óleos base.

Capítulo 7

Noções básicas de tribologia.

Entre as muitas engrenagens e partes móveis dentro das transmissões automáticas, o fluido lubrificante desempenha um papel essencial impedindo o contato direto entre as superfícies, minimizando o desgaste e reduzindo perdas de energia durante o funcionamento. A lubrificação, mesmo não sendo a única função cumprida pelos ATF's, é vital e seu estudo está compreendido na tribologia, à qual esta seção se dedica a introduzir e expor, tratando alguns dos mais importantes de seus aspectos no contexto das transmissões automáticas.

Durante seus trabalhos em 1901-1902, *Stribeck R* (ZHU; WANG; WANG, 2015), engenheiro alemão, encontrou uma relação característica entre a velocidade angular e o coeficiente de atrito entre as superfícies de mancais, uma relação parecida já havia sido observada por *Thurston, R. H.* Ambos observaram uma queda abrupta do coeficiente de atrito a partir de certa velocidade e *Stribeck* verificou a ocorrência de um valor mínimo de coeficiente de atrito. Mais tarde, *Mayo D Hersey* propôs que a variação do coeficiente de atrito fosse estudada em função de uma junção de parâmetros composta da viscosidade do fluido, da velocidade angular e da pressão local, uma construção chamada atualmente de número de *Hersey*, ou ainda, número de *Sommerfeld*. (MINAMI, 2017) O diagrama construído é denominado curva de *Stribeck* e se divide, grosseiramente, em quatro regimes pelos quais o lubrificante transita numerosas vezes em operação (LU; KHONSARI; GELINCK, 2006). A baixos valores para o número de *Hersey*, as asperidades das superfícies metálicas ou ainda dos pacotes de embreagens que realizam os engates das marchas como descrito no capítulo 3, as deixam em contato direto ou pouco espaçadas pelo fluido. Esta situação é denominada regime de lubrificação de limítrofe, ela representa um estágio em que o fluido é incapaz de promover a lubrificação necessária, uma vez que a espessura de filme protetor é menor que o tamanho médio das rugosidades locais sendo, portanto, descontínuo. O comportamento do coeficiente de atrito neste regime é aproximadamente constante, como função do número de *Hersey* e pode ser determinado experimentalmente (ZHU; WANG; WANG, 2015).

Conforme a velocidade do sistema cresce, assim como observado por *Stribeck* e *Thurston*, o coeficiente de atrito experimenta uma súbita queda explicada pelo surgimento de uma camada de filme protetor formada pelo lubrificante capaz de separar, por pouco, as superfícies, tal situação é conhecida como regime misto de lubrificação e é vigente até que o coeficiente de atrito atinge um valor de mínimo em que a camada protetora é capaz de separar totalmente

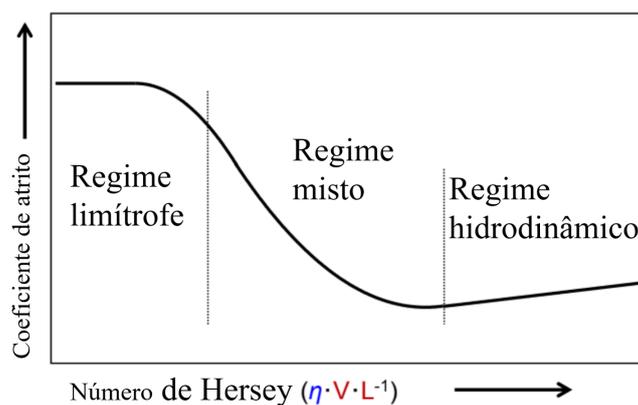


Figura 7.1: Representação da curva de *Stribeck*, evidenciando os diferentes regimes de lubrificação. Adaptado de (ZHU; WANG; WANG, 2015)

as superfícies enquanto mantém uma relação de atrito interno mínima, esta é a situação ideal nomeada de regime elastohidrodinâmico de lubrificação.

A próxima mudança de comportamento do coeficiente de atrito e a última região da curva de *Stribeck* se manifesta a altos valores do número de *Hersey* e apresenta um crescimento contínuo do coeficiente de atrito em que a espessura do filme protetor atinge a medida, em média, três vezes o tamanho médio das asperidades locais, este é o regime hidrodinâmico de lubrificação (INGRAM et al., 2010a).

7.1 Tribologia aplicada aos ATF's.

Dentro de uma transmissão automática, em meio aos diversos componentes, a tribologia rege o desempenho da máquina com grande dependência do fluido lubrificante, por causa da sua interferência nos valores dos coeficientes de atrito. Especificamente, entre os pacotes de embreagens, é desejável um baixo coeficiente de atrito estático, e alto coeficiente de atrito dinâmico, a fim de permitir engates suaves a baixas velocidades e, a altas velocidades (correspondente ao regime de lubrificação hidrodinâmica), minimizar efeitos de desgaste e perdas de energia. Baixos coeficientes de atrito estático podem tornar o conjunto da transmissão incapaz de manter o veículo parado sem provocar grandes aumentos de temperatura, muito acima das temperaturas tipicamente atingidas, em torno de 95°C (TUNG; MCMILLAN, 2004).

As capacidades que os ATF's apresentam no âmbito tribológico são dependentes da carga aditiva presente e, conforme o tempo de serviço da transmissão, pode sofrer grandemente, comprometendo a operação do conjunto como um todo. Nesse contexto, a título de ilustração, o capítulo 8, que segue, expõe uma avaliação de propriedades reológicas entre três fluidos de transmissão automática, dos quais dois foram retirados de transmissões reais.

Capítulo 8

Avaliação reológica de ATF's em diferentes condições de serviço.

A necessidade de efetuar a troca do fluido de transmissão periodicamente ou não, é um tema marcado por controvérsias. Enquanto por um lado algumas montadoras afirmam que os sistemas de transmissão lubrificados com fluidos de transmissão do tipo "full-life"¹ não precisam ser substituídos, por outro lado há oficinas abarrotadas de carros, com quilometragens de serviço superiores a 100.000 quilômetros cujas transmissões foram severamente danificadas por razão de não receberem a manutenção esperada. O termo quilometragem de serviço empregado aqui refere-se à distância percorrida registrada no hodômetro do veículo desde a sua inserção no sistema de transmissão até a sua drenagem no momento da troca periódica.

De acordo com as montadoras, ao contrário do óleo do motor, um fluido de transmissão automática não experimenta variações de temperatura tão elevadas e não entra em contato com os gases provenientes da combustão dos combustíveis, de modo que, embora escurecido, suas propriedades tribológicas encontram-se preservadas.

Da perspectiva das oficinas mecânicas, dentre os argumentos apresentados encontram-se o fato inquestionável de que com a evolução da quilometragem de serviço o óleo escurece devido a presença de impurezas presentes no fluido de transmissão: humidade, partículas metálicas decorrentes do atrito entre as diferentes partes do sistema e ainda a oxidação do lubrificante e seus aditivos. Com o passar do tempo as impurezas tendem a se acumular nos inúmeros dutos e eletroválvulas do sistema, comprometendo a eficácia do processo de lubrificação e gerando o desgaste prematuro do conjunto e superaquecimento das peças (figura 8.1).

Este capítulo não procura responder a esta importante questão: se é preciso substituir o fluido de uma transmissão automática, e sim, a título de exemplo, avaliar se os parâmetros reológicos de um fluido de transmissão de norma GM DEXRON VI, em diferentes quilometragens de serviço são modificados.

¹Vitalícios.

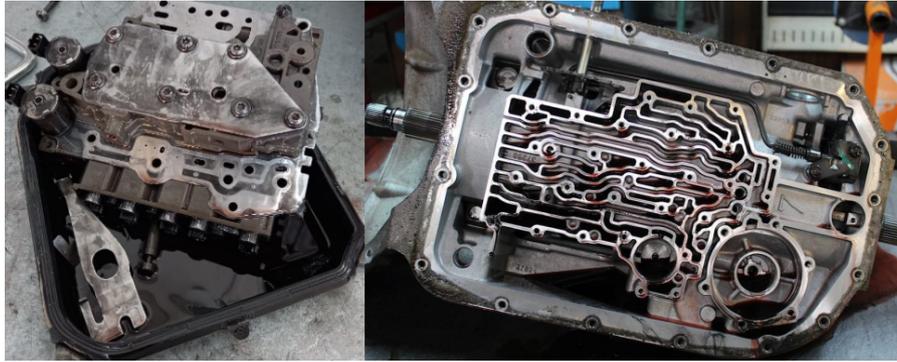


Figura 8.1: Sistemas de transmissão automática durante o processo de manutenção devido a problemas associados as impurezas acumuladas conforme a quilometragem de serviço.

8.1 Metodologia.

8.1.1 Amostras estudadas.

Neste estudo foram utilizados três fluidos de transmissão automática que atendem à norma "GM DEXRON VI". O primeiro, denominado "Fluido A" é tomado como controle, trata-se de um lubrificante, nunca introduzido em um sistema de transmissão. Ele apresenta aspecto uniforme, transparência e coloração avermelhada, como ilustrado na figura 8.2.

Os demais ATF's são amostras cuidadosamente retiradas de transmissões 6T30 e 6L50², que equipavam um modelo de passeio e um utilitário, ambos de marca Chevrolet. Quanto ao veículo de passeio, trata-se de um Cobalt fabricado em 2014, com motorização 1.4, dentre os dois, o mais leve. Por outro lado, o utilitário de onde foi recolhido o fluido C é uma caminhonete S10, de motorização 2.8 naturalmente aspirada e mais pesada. Foi esperado que os resultados revelassem percas consideravelmente maiores de viscosidade, dados os pesos e modos de condução dos veículos.

8.1.2 Reologia rotacional e oscilatória.

Os ensaios reológicos foram realizados em uma plataforma modular Thermo Scientific, modelo Haake Mars II. Este aparato dispõe da tecnologia de *air bearing*, que torna possível a realização de ensaios reológicos rotacionais e oscilatórios com controle da taxa de cisalhamento (modo CR), da tensão de cisalhamento (modo CS) e da deformação de cisalhamento (modo CD). Em todos os casos foi empregada a geometria placa-placa com o sensor de cisalhamento PP35S Ti (placa com raio de 35 mm e separação entre as placas de 0,2 mm). O controle térmico possui precisão de $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Nesses ensaios foi utilizada uma peça de teflon sobre o sistema para garantir a estabilidade térmica da amostra (figura 8.3). Os dados da tensão em função da taxa de cisalhamento, a então chamada curva de fluxo, foram obtidos no modo rotacional com controle da taxa de cisalhamento no modo CR no intervalo de $0,1 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 1000,0 \text{ s}^{-1}$ a uma temperatura constante de $T = 25,0^\circ\text{C}$. Primeiramente, a taxa de cisalhamento é aumentada

²A nomenclatura adotada pela montadora para estes sistemas de transmissão informa, nesta ordem, o número de velocidades do equipamento, sua orientação (transversal ou longitudinal, indicados pelas letras T ou L) e uma estimativa do torque máximo suportado.



Figura 8.2: Fluidos de transmissão (GM DEXRON VI), submetidos a diferentes condições de serviço. Fluido A – controle. Fluido B - de serviço em uma transmissão automática 6T30. Fluido C - de serviço em uma transmissão automática 6L50.

progressivamente até alcançar seu valor máximo. Na sequência, seguindo o mesmo protocolo da curva de subida, a taxa de cisalhamento é reduzida gradualmente. Os valores da viscosidade dinâmica versus a taxa de cisalhamento, a então chamada curva de viscosidade, foram calculados por meio da equação 2.4 à partir da curva de fluxo correspondente.

A medida da viscosidade dinâmica como função da temperatura foi realizada no modo rotacional com controle da taxa de cisalhamento no modo CR a um valor constante de $\dot{\gamma} = 500 \text{ s}^{-1}$, no intervalo $-5,0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100,0^{\circ}\text{C}$.

Os ensaios oscilatórios dinâmicos em função da amplitude de deformação (varredura de amplitude) G' e G'' foram medidos em temperatura ($T = 25,0^{\circ}\text{C}$) e frequência fixas ($f = 1,0 \text{ Hz}$), no modo oscilatório CS no intervalo de $0,1 \text{ Pa} \leq \tau \leq 10 \text{ Pa}$. Os ensaios oscilatórios dinâmicos em função da frequência (varredura de frequência) G' e G'' foram medidos a mesma temperatura, no modo oscilatório CS no intervalo de $0,1 \text{ Hz} \leq f \leq 100,0 \text{ Hz}$ a uma amplitude de tensão fixa em $\tau = 0,5 \text{ Pa}$.

8.1.3 Resultados e discussão.

As curvas de fluxo e viscosidade obtidas com os ATF's (Fluidos A, B e C) encontram-se ilustradas na figura 8.4. A partir da curva de fluxo, no caso do fluido controle (Fluido A), é possível perceber que a tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de cisalhamento,



Figura 8.3: Reômetro Haake Mars II, utilizado nos ensaios reológicos rotacionais e oscilatórios na configuração placa-placa.

confirmando o comportamento reológico esperado, condizente ao de um fluido Newtoniano. Este fato pode ser confirmado a partir de suas curvas de viscosidade correspondentes, em que suas viscosidades dinâmicas permaneceram constantes para todos os valores de taxas de cisalhamento.

Ao comparar as curvas de fluxo exibidas pelos fluidos B e C, verifica-se que a correlação linear entre $\tau \times \dot{\gamma}$ foi preservada, demonstrando que a presença dos contaminantes decorrentes da quilometragem de serviço não modificou o comportamento reológico dos ATF's. Constatase, nas curvas de viscosidade, entretanto, que o fluido B exibiu uma redução de 11,5% no valor da viscosidade dinâmica, em contraste com o fluido C que experimentou uma diminuição de viscosidade de 9,4%. Embora a comparação destes resultados seja prejudicada pelo fato de que os sistemas de transmissão em que estes óleos não idênticos, eles concordam com o fato de que a presença das impurezas decorrentes da quilometragem de serviço é pequena. Apesar do caráter ilustrativo dos ensaios realizados, foram claros os sinais de desgaste, como perdas permanentes de viscosidade entre os fluidos B e C. Como descrito em (SARKAR et al., 2002), os processos pelos quais os ATF's passam provocam, naturalmente, a quebra dos polímeros de grande massa molecular presentes, responsáveis por controlar a viscosidade do fluido a diferentes temperaturas. Este resultado mostra ainda que, dada a sua pequena expressividade, os ATF's

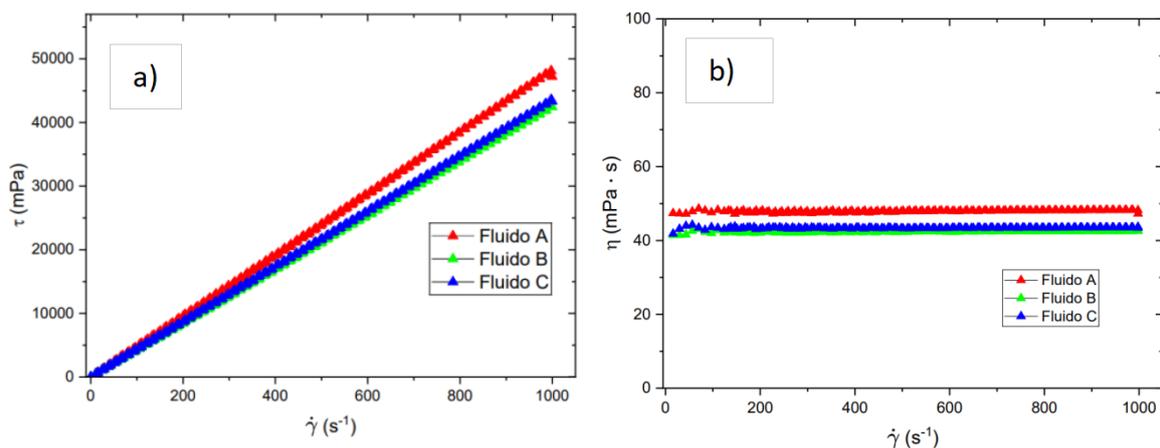


Figura 8.4: Curvas de fluxo (a) e viscosidade (b) exibidos pelos Fluidos A, B e C à temperatura de 25,0°C.

modernos possuem grande resistência ao desgaste e são capazes de cumprir suas funções durante extensos períodos, em condições normais.

A sensibilidade da viscosidade dinâmica desses ATF's a temperatura também foi avaliada e os resultados obtidos encontram-se ilustrados na figura 8.5. Verifica-se que o comportamento apresentado por todos os fluidos é condizente com a equação 2.3 do capítulo 4. Para temperaturas abaixo de 10,0 °C o valor da viscosidade dinâmica dos ATF's é uma ordem de grandeza superior quando comparada aos valores de viscosidade medidos na faixa de temperatura de trabalho das transmissões automáticas em questão (40 °C < T < 100 °C). Este mesmo comportamento foi apresentado pelas três amostras. Uma pequena diferença nos valores de viscosidade dinâmica (5% a 10%) foi observada para temperaturas abaixo de 25 °C. Acima desta temperatura as três amostras apresentaram praticamente os mesmos valores de viscosidade dinâmica. Este resultado demonstra que as impurezas introduzidas aos ATF's modificaram muito pouco sua sensibilidade a variações de temperatura. Considerando que o índice de viscosidade descrito no capítulo 2 é calculado apenas na faixa de temperatura de trabalho das transmissões automáticas, a partir deste resultado é possível afirmar que a quilometragem de serviço não modificou expressivamente o índice de viscosidade dos ATF's, colaborando com a posição defendida por algumas montadoras de que os aditivos presentes nos ATF's impedem que ocorram variações de viscosidade decorrentes da quilometragem de serviço.

Os resultados anteriores, em especial as curvas de fluxo e viscosidade, demonstraram que os ATF's possuem um comportamento reológico Newtoniano. Em consonância com o que foi discutido no capítulo 2, em se tratando de um fluido real, uma fração muito pequena da energia transferida ao fluido com o objetivo de deforma-lo será armazenada e o restante será dissipado na forma de calor. Os módulos de recuperação elástica e perda viscosa, G' e G'' , nos permitem dimensionar estas frações. Os valores de G' e G'' , medidos em função da variação da amplitude de oscilação para os 3 ATF's são ilustrados na figura 8.6. Todas as amostras exibiram $G'' \gg G'$. Em relação ao comportamento frente a mudanças de amplitude, as três amostras apresentaram valores constantes de G' e G'' , indicando que os ATF's exibem um comportamento reológico essencialmente viscoso que se assemelha ao exibido por um fluido ideal. O fluido C, com maior

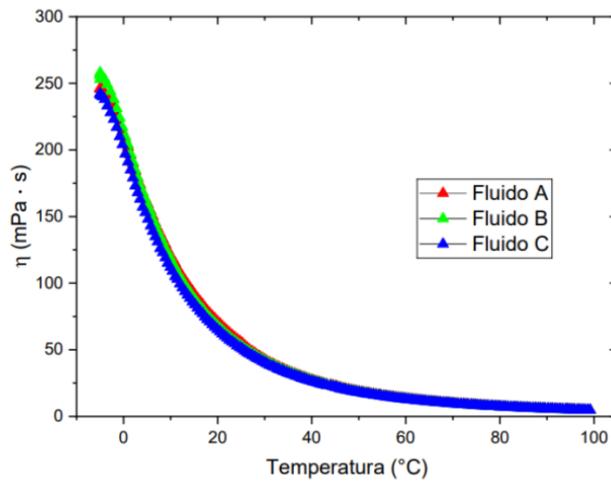


Figura 8.5: Curvas de viscosidade exibidas pelos fluidos A, B e C, entre 5°C e 100°C, a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma} = 500\text{s}^{-1}$

quilometragem de serviço exibiu valores para G' menores do que o observado no fluido A.

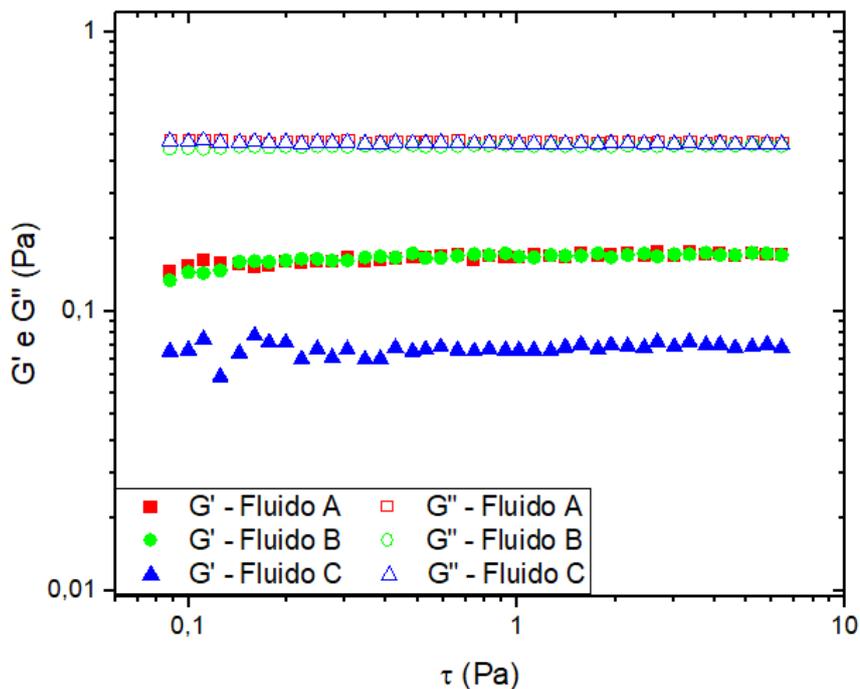


Figura 8.6: Valores dos módulos de recuperação elástica (G') e (G'') módulo de dissipação viscosa exibidos pelos ATF's em função da amplitude da tensão de deformação (varredura de amplitude).

Os valores de G' e G'' , medidos em função da variação da frequência de oscilação para os 3 ATF's são ilustrados na figura 8.7. Para frequências menores que 4Hz , todas as amostras exibiram $G \gg G''$ indicando que seu comportamento viscoso excede o comportamento elástico. Nestas condições é correto afirmar que os ATF's se comportam como um fluido ideal e a amostra tem tempo suficiente para reagir a deformação que lhe foi imposta. Em valores de frequência intermediário, ambos os componentes se igualam e para frequências maiores 10 Hz, o componente elástico se torna dominante uma vez que $G' > G''$ indicando que o fluido tende

a se comportar como um meio elástico porque não há tempo suficiente para que o fluido possa reagir à deformação atribuída. Ao comparar as curvas exibidas pelos A e B, verifica-se que ambas exibem um comportamento similar, exceto por um ligeiro decréscimo nos valores de G'' . Quando a comparação é realizada entre o A e C, verifica-se que o ponto em que G'' se iguala a G' ocorre a uma frequência maior, com valores de G' menores.

A fraca elasticidade evidenciada nas varreduras de amplitude e frequência pode ter origem em vários fatores, dentre eles destacam-se os íons presentes no lubrificante e processos de orientação e estiramento das macromoléculas que são incorporadas como aditivos, como detergentes e modificadores de viscosidade. A diminuição nos valores de G' observados tanto nas varreduras de amplitude quanto nas varreduras de frequência devido ao aumento da quilometragem de serviço indica que, embora a sensibilidade do lubrificante não tenha sofrido uma variação expressiva, a diminuição das componentes elásticas do comportamento reológico é um indicativo da degradação do lubrificante pois pode estar associado à sua oxidação, à quebra das macromoléculas utilizadas como aditivos ou mesmo à presença de impurezas tais como partículas metálicas provenientes do atrito entre as diferentes partes mecânicas do sistema.

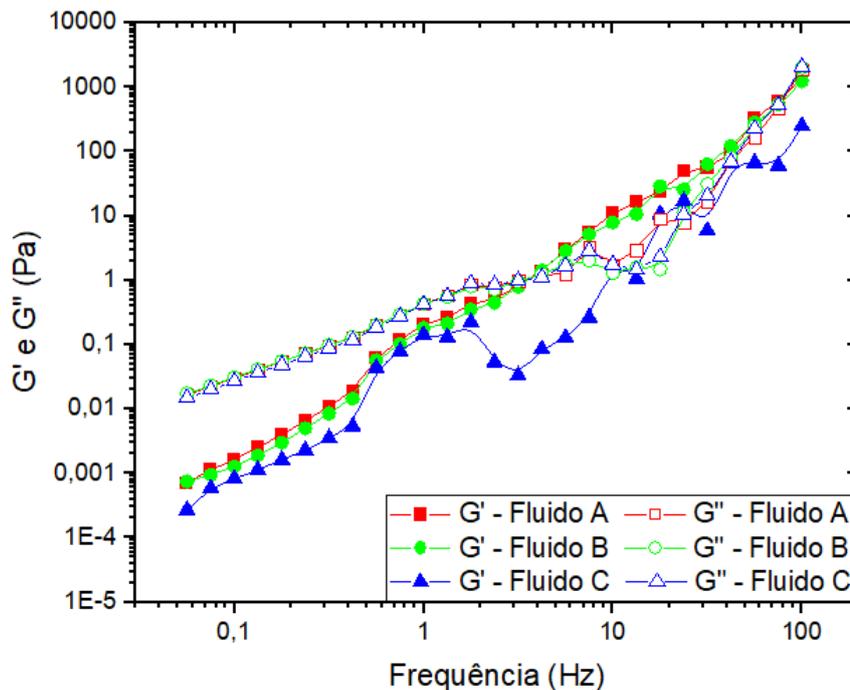


Figura 8.7: Valores dos módulos de recuperação elástica (G') e módulo de dissipação viscosa (G'') exibidos pelos ATF's em função da frequência de oscilação (varredura de amplitude)

Capítulo 9

Considerações finais

Este trabalho cumpriu sua proposta como uma revisão bibliográfica acerca dos fluidos de transmissão automática, tendo seu valor atribuído a possibilitar a compreensão de sua composição e comportamento visando nortear a criação dos futuros fluidos lubrificantes em transmissões automáticas.

Para compreender os desafios enfrentados no desenvolvimento de ATF's, foi necessário introduzir os princípios de funcionamento de uma transmissão automática para compreender qual a função de um fluido de transmissão e quais os processos aos quais eles são submetidos, mencionando ainda as transmissões automatizadas e continuamente variáveis (CVT's). Aspectos como a temperatura de trabalho, pressões atingidas e a composição dos elementos de vedação são chave para a escolha do óleo base e da carga aditiva.

Esta revisão abordou de forma simples as muitas propriedades que os ATF's possuem e que podem ser requisitadas pelos fabricantes de transmissões automáticas, desde seu coeficiente de atrito até a viscosidade, passando por calor específico, volatilidade, índice de viscosidade, ponto de fluidez e diversas outras. Foi verificado que, ao longo da história, esses valores (e sua quantidade) sofreram numerosas alterações, acompanhando as demandas do mercado por eficiência energética, durabilidade do fluido e compatibilidade ambiental. Esta narrativa culminou em fluidos grandemente especializados nas especificações e normas que atendem.

A origem dos lubrificantes de transmissão automática também foi documentada, com foco na produção, refinamento e classificação do óleo base com o qual são combinados os pacotes de aditivos, revelando os pontos mais importantes no desenvolvimento de lubrificantes nos últimos tempos. A carga aditiva e sua composição, bem como organização foram estudadas sendo muito relevantes pois sua capacidade de alterar as especificidades dos ATF's é notável e muito explorada na fabricação destes fluidos. Muitas dessas substâncias são adicionadas aos óleos base com objetivo de alterar os comportamentos reológico e tribológico dos ATF's.

Foram exploradas as propriedades reológicas básicas associadas aos fluidos de transmissão automática estudados, com ênfase nas que representam indicadores de desgaste, como a viscosidade e os módulos de armazenamento elástico (G') e perda viscosa (G''). O caso de um fluido newtoniano, representado pelos ATF's estudados possui uma descrição que envolve relações simples entre as grandezas básicas da reometria, como a tensão e a taxa de cisalhamento.

Além disso, como o estudo do contato entre superfícies, a tribologia revelou ser uma grande

ferramenta no entendimento da criação de filmes protetores por parte do lubrificante e das variações do coeficiente de atrito conforme os regimes de lubrificação representados na curva de *Stribeck*.

Por fim, uma análise simples com caráter ilustrativo foi conduzida, levando a prova três amostras de fluido, duas das quais foram submetidas a quilometragens diferentes de serviço em transmissões reais. Os ensaios revelaram pequenas variações nos parâmetros reológicos do material, como os módulos G' e G'' , a viscosidade dinâmica e suas variações com a temperatura, evidência da grande durabilidade e qualidade dos fluidos de transmissão automática disponíveis atualmente.

Bibliografia

AKCELRUD, L. *Fundamentos da ciência dos polímeros*. [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2006. 8, 9, 10

BARNES, H. *A Handbook of Elementary Rheology*. University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000. (Raymond F. Boyer Library Collection). ISBN 9780953803200. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=zBYvAQAAIAAJ>>. 5

BROMBERGS, K. Automatic transmission fluids: history and development. In: *Fuels and Lubricants, Seminar, 1987, Melbourne, Australia*. [S.l.: s.n.], 1987. 1, 2, 17

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. Lubrificantes e lubrificação industrial. *Rio de Janeiro: Interciência*, 2006. 11

CASSU, S. N.; FELISBERTI, M. I. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 28, p. 255–263, 2005. 8, 9, 10

CHAN, C.-H. et al. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 93, p. 145–157, 2018. 25

CHIRINOS, M.; GONZALEZ, J.; LAYRISSE, I. Rheological properties of crude oils from the orinoco oil belt and their mixtures with diluents. *Revista Técnica Intevep*, CENTRO INFORMACION TECNICA APARTADO POSTAL 76343, CARACAS 1070A, VENEZUELA, v. 3, n. 2, p. 103–115, 1983. 4, 16

DRESEL, W. Synthetic base oils. *Lubricants and Lubrication*, Wiley Online Library, p. 83–116, 2017. 27

FTI Performance Automatic Transmission Clutch Packs F4049B. 2023. Disponível em: <<https://www.summitracing.com/parts/FTI-F4049B>>. Acesso em: 06 mar 2024. 14

GHOSH, P. et al. Shear stability of polymers used as viscosity modifiers in lubricating oils. NISCAIR-CSIR, India, 1998. 21

INGRAM, M. et al. Frictional properties of automatic transmission fluids: part ii—origins of friction–sliding speed behavior. *Tribology Transactions*, Taylor & Francis, v. 54, n. 1, p. 154–167, 2010. 34

INGRAM, M. et al. Frictional properties of automatic transmission fluids: Part i—measurement of friction–sliding speed behavior. *Tribology Transactions*, Taylor & Francis, v. 54, n. 1, p. 145–153, 2010. 14, 21

JR, S. V. C. et al. Técnicas de caracterização de polímeros. *Artliber, São Paulo*, v. 430, n. 2004, 2004. 8, 9, 10

- KAHRAMAN, A. Planetary gear train dynamics. 1994. [12](#), [13](#)
- KEMP, S. P.; LINDEN, J. L. *Physical and chemical properties of a typical automatic transmission fluid*. [S.l.], 1990. [16](#), [18](#), [19](#), [29](#)
- KOBE, R. A.; WAGNER, J. C. *The Chrysler TorqueFlite and Automatic Transmission Fluid*. [S.l.], 1968. [1](#)
- LU, X.; KHONSARI, M.; GELINCK, E. The stribeck curve: experimental results and theoretical prediction. *Journal of tribology*, v. 128, n. 4, p. 789–794, 2006. [33](#)
- MACOSKO, C. W. Rheology: Principles, measurements, and applications. In: . [s.n.], 1994. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59922352>. [4](#)
- MANG, T.; LINGG, G. Base oils. *Lubricants and Lubrication*, Wiley Online Library, p. 51–82, 2017. [17](#), [25](#), [26](#), [27](#), [28](#), [31](#)
- MINAMI, I. Molecular science of lubricant additives. *Applied sciences*, MDPI, v. 7, n. 5, p. 445, 2017. [20](#), [21](#), [33](#)
- NEWCOMB, T.; TIPTON, C.; JAO, T.-C. *Automatic transmission and driveline fluids*. [S.l.], 2007. [18](#), [19](#), [22](#)
- OHNISHI, H. et al. A study on road slope estimation for automatic transmission control. *JSAE review*, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 235–240, 2000. [14](#)
- OLIVEIRA, R. M. d. Compósito de poliuretano elastomérico reforçado com fibra de juta: estudo das propriedades dinâmico-mecânicas e viscoelásticas. Universidade Federal de São Carlos, 2013. [8](#), [9](#), [10](#)
- SARKAR, R. et al. *Low and High Temperature Non-Newtonian Behavior of Automatic Transmission Fluids*. [S.l.], 2002. [20](#), [38](#)
- SCHRAMM, G. et al. *A practical approach to rheology and rheometry*. [S.l.]: Haake Karlsruhe, 1994. [8](#), [9](#), [10](#)
- SOCIN, R. J.; WALTERS, L. K. Manual transmission synchronizers. *SAE Transactions*, SAE International, v. 77, p. 31–65, 1968. ISSN 0096736X, 25771531. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/44565046>. [1](#)
- THE Importance of Regular Servicing for Automatic Transmissions. 2023. Disponível em: <https://www.iame.com.au/the-importance-of-regular-servicing-for-automatic-transmissions>. Acesso em: 06 mar 2024. [13](#)
- TUERO, A. G. et al. Influence of additives concentration on the electrical properties and the tribological behaviour of three automatic transmission fluids. *Lubricants*, MDPI, v. 10, n. 11, p. 276, 2022. [20](#)
- TUNG, S. C.; MCMILLAN, M. L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. *Tribology International*, Elsevier, v. 37, n. 7, p. 517–536, 2004. [15](#), [34](#)
- WU, M. M.; HO, S. C.; LUO, S. Synthetic lubricant base stock. *Springer Handbook of Petroleum Technology*, Springer, p. 1043–1061, 2017. [27](#)

ZENG, N. *Compatibility Study of Fluorinated Elastomers in Automatic Transmission Fluids*. [S.l.], 2008. [29](#)

ZHU, D.; WANG, J.; WANG, Q. J. On the stribeck curves for lubricated counterformal contacts of rough surfaces. *Journal of Tribology*, American Society of Mechanical Engineers, v. 137, n. 2, p. 021501, 2015. [33](#), [34](#)