

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

BRUNO HENRIQUE DA SILVA ADÃO

ANÁLISE DE MODELOS DE PREDIÇÃO DE VISCOSIDADE PARA ÓLEOS
LUBRIFICANTES

SÃO CARLOS – SP

2023

BRUNO HENRIQUE DA SILVA ADÃO

ANÁLISE DE MODELOS DE PREDIÇÃO DE VISCOSIDADE PARA ÓLEOS
LUBRIFICANTES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Ruy de Sousa
Júnior

São Carlos – SP

2023

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 22 de janeiro de 2024 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Ruy de Sousa Júnior, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Convidado: Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

Professor da Disciplina: José Maria Corrêa Bueno, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar).

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Kelly, ao meu pai Silvano e ao meu irmão Alisson pelo apoio que me deram durante toda minha trajetória de estudos, juntamente com meus avós Ivone e Afonso.

Ao meu gestor de estágio Gerson Ber, por disponibilizar o laboratório para a realização das análises, e aos meus colegas analistas, Valter, Diego e Fernando, pelo apoio prestado durante a realização deste trabalho.

Ao Instituto Embraer de Educação e Pesquisa por me dar apoio financeiro durante minha graduação.

Ao professor Ruy de Sousa Júnior por me apoiar durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Modelos que estimam a viscosidade do resultado da mistura de fluidos têm sido alvos de estudo durante décadas, e foi o objeto de estudo neste trabalho. Para se trabalhar com a combinação de fluidos, foram utilizados óleos básicos minerais, básicos sintéticos, um aditivo melhorador de índice de viscosidade e quatorze óleos lubrificantes, sendo sete deles de origem mineral e os outros sete de origem sintética. O método utilizado se dividiu em duas etapas, sendo a primeira a adição do aditivo nos lubrificantes, em sete concentrações que variavam entre 0,5% e 9,5% m/m. Após isso, mediu-se a densidade, viscosidade dinâmica e cinemática, todas a 100 °C, e foram comparados estes valores experimentais com os valores teóricos calculados para treze modelos diferentes de predição de viscosidade. Em seguida, foi calculado o erro absoluto médio, a raiz do erro quadrático médio e erro percentual absoluto médio, com o intuito de se verificar o modelo com melhor desempenho. A segunda etapa é semelhante à primeira, mas desta vez, ao invés de adicionar o aditivo, foram adicionados os óleos básicos sintéticos nos lubrificantes sintéticos e os básicos minerais nos lubrificantes minerais. Realizados as medições e cálculos, verificou-se que não houve um modelo com um desempenho melhor do que outro ao se adicionar óleos básicos nos lubrificantes, devido aos altos valores de desvio encontrados. Entretanto, os modelos de Arrhenius, Power law e Grunberg-Nissan foram os melhores na predição da viscosidade quando se adicionou o aditivo melhorador de índice de viscosidade nos óleos lubrificantes.

Palavras-chave: Viscosidade. Predição. Lubrificante.

ABSTRACT

Models that estimate the resulting viscosity of blending fluids have been studied for centuries and were the object of study in this work. To work with the combination of fluids, mineral base oils, synthetic base oils, a viscosity index improving additive and fourteen lubricating oils were used, seven of which were of mineral origin and the other seven were of synthetic origin. The method used was divided into two stages, the first of them was the addition of the additive to the lubricants, in seven concentrations that varied between 0.5% and 9.5% m/m. After that, the density, dynamic and kinematic viscosity were measured, all of them at 100 °C, and these experimental values were compared with the theoretical values calculated for thirteen different viscosity blending models. Then, the mean absolute error, the root mean square error and the mean absolute percentage error were calculated to verify the model with the best performance. The second stage is similar to the first, but this time, instead of adding the additive, synthetic base oils were added to synthetic lubricants and mineral base oils were added to mineral lubricants. After carrying out measurements and calculations, it was found that there was no model with better performance than another when adding base oils to lubricants, due to the high deviation values found. However, the Arrhenius, Power law and Grunberg-Nissan models were the best in predicting viscosity when viscosity index improving additives were added to lubricating oils.

Keywords: Viscosity. Prediction, Lubricant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de velocidade do escoamento de um fluido	16
Figura 2 – Algumas cadeias carbônicas de hidrocarbonetos que constituem óleos básicos.....	20
Figura 3 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.....	41
Figura 4 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.....	42
Figura 5 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.....	42
Figura 6 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.....	43
Figura 7 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.....	43
Figura 8 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.....	44
Figura 9 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.....	45
Figura 10 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.....	45
Figura 11 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.....	46
Figura 12 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.....	46
Figura 13 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.....	47
Figura 14 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.....	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Funções adicionais de óleos lubrificantes automotivos e industriais.....	17
Quadro 2 – Classificação SAE J300 de acordo com a viscosidade.	18
Quadro 3 – Categorias de óleos básicos.	19
Quadro 4 – Óleos que foram adicionados nos óleos lubrificantes.....	31
Quadro 5 – Óleos lubrificantes que foram estudados.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de teor e massa utilizados neste trabalho.	32
Tabela 2 – Resultados da regressão do modelo Power law referente às misturas de lubrificante com óleo básico.	36
Tabela 3 – Resultados da regressão do modelo Power law referente às misturas de lubrificante com VI.	37
Tabela 4 – Resultados da regressão do modelo Grunberg-Nissan referente às misturas de lubrificante com óleo básico.	38
Tabela 5 – Resultados da regressão do modelo Grunberg-Nissan referente às misturas de lubrificante com VI.	39
Tabela 6 – Resultados das medições dos componentes “puros” utilizados no trabalho.	40
Tabela 7 – Variação média de viscosidade dos lubrificantes entre as misturas com teor de 0,5% e 9,5%.	48
Tabela 8 – Dados coletados do S-15W40 durante a fase de adição de OBS.	53
Tabela 9 – Dados coletados do S-5W30 durante a fase de adição de OBS.	53
Tabela 10 – Dados coletados do S-15W50 durante a fase de adição de OBS.	53
Tabela 11 – Dados coletados do SD-15W40 durante a fase de adição de OBS.	54
Tabela 12 – Dados coletados do SD-10W30 durante a fase de adição de OBS.	54
Tabela 13 – Dados coletados do M-SC durante a fase de adição de OBM.	54
Tabela 14 – Dados coletados do M-85W140 durante a fase de adição de OBM.	55
Tabela 15 – Dados coletados do S-SC durante a fase de adição de OBS.	55
Tabela 16 – Dados coletados do M-460 durante a fase de adição de OBM.	55
Tabela 17 – Dados coletados do M-680 durante a fase de adição de OBM.	56
Tabela 18 – Dados coletados do S-100 durante a fase de adição de OBS.	56
Tabela 19 – Dados coletados do M-320 durante a fase de adição de OBM.	56
Tabela 20 – Dados coletados do M-68 durante a fase de adição de OBM.	57
Tabela 21 – Dados coletados do M-220 durante a fase de adição de OBM.	57
Tabela 22 – Dados coletados do S-15W40 durante a fase de adição de VI.	58
Tabela 23 – Dados coletados do S-5W30 durante a fase de adição de VI.	58
Tabela 24 – Dados coletados do S-15W50 durante a fase de adição de VI.	58
Tabela 25 – Dados coletados do SD-15W40 durante a fase de adição de VI.	59
Tabela 26 – Dados coletados do SD-10W30 durante a fase de adição de VI.	59

Tabela 27 – Dados coletados do M-SC durante a fase de adição de VI.	59
Tabela 28 – Dados coletados do M-85W140 durante a fase de adição de VI.	60
Tabela 29 – Dados coletados do S-SC durante a fase de adição de VI.	60
Tabela 30 – Dados coletados do M-460 durante a fase de adição de VI.	60
Tabela 31 – Dados coletados do M-680 durante a fase de adição de VI.	61
Tabela 32 – Dados coletados do S-100 durante a fase de adição de VI.	61
Tabela 33 – Dados coletados do M-320 durante a fase de adição de VI.	61
Tabela 34 – Dados coletados do M-68 durante a fase de adição de VI.	62
Tabela 35 – Dados coletados do M-220 durante a fase de adição de VI.	62
Tabela 36 – Resultados do MAE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e VI.	63
Tabela 37 – Resultados do RMSE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e VI.	64
Tabela 38 – Resultados do MAPE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e VI.	65
Tabela 39 – Resultados do MAE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e óleo básico.....	66
Tabela 40 – Resultados do RMSE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e óleo básico.....	67
Tabela 41 – Resultados do MAPE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e óleo básico.....	68
Tabela 42 – Resultados experimentais e teóricos na etapa de adição de óleo básico	69
Tabela 43 – Dados experimentais e teóricos para os modelos Power law, Arrhenius e Grunberg-Nissan nas misturas entre óleo lubrificante e VI.	72

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MRV	Mini-Rotary Viscometer
OCP	Olefin Copolymer
RMSE	Root Mean Square Error
SAE	Society of Automotive Engineers
VI	Viscosity Index
ZDDP	Zinc Dialkyldithiophosphate

LISTA DE SÍMBOLOS

x_i	Fração mássica do componente i
Φ_i	Fração volumétrica do componente i
ν	Viscosidade cinemática
μ	Viscosidade dinâmica
ν_i	Viscosidade cinemática
μ_i	Viscosidade dinâmica
ρ	Densidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	VISCOSIDADE	16
2.2	ÓLEO LUBRIFICANTE	17
2.2.1	Óleos básicos	19
2.2.2	Aditivos	21
2.3	MODELOS DE PREDIÇÃO DE VISCOSIDADE	22
2.3.1	Modelo de Kendall-Monroe	23
2.3.2	Modelo ASTM 7152-11	23
2.3.3	Modelo Linear	24
2.3.4	Modelo de Arrhenius	24
2.3.5	Modelo de Bingham	25
2.3.6	Modelo de Cragoe	25
2.3.7	Modelo de Centeno	25
2.3.8	Modelo de Refutas	26
2.3.9	Modelo de Chevron	26
2.3.10	Modelo do Fator de mistura	27
2.3.11	Modelo de Índice de mistura	27
2.3.12	Modelo Power Law	28
2.3.13	Modelo de Grunberg-Nissan	28
2.4	METODOLOGIA DE REGRESSÃO	29
2.4.1	LEVENBERG-MARQUARDT	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	SELEÇÃO DOS COMPONENTES A SEREM UTILIZADOS	31
3.2	PREPARO DAS MISTURAS	32
3.3	ANÁLISE DA VISCOSIDADE E DENSIDADE DAS MISTURAS	33
3.4	CÁLCULO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA	33
3.5	CÁLCULOS DOS VALORES TEÓRICOS DOS MODELOS PREDITIVOS	34
3.6	CÁLCULOS DAS REGRESSÕES DOS MODELOS CORRELATIVOS	34
3.7	CÁLCULOS DOS ERROS	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	RESULTADOS DAS REGRESSÕES DOS MODELOS CORRELATIVOS	36
4.1.2	Resultados da regressão do modelo Power Law	36
4.1.3	Resultados da regressão do modelo Grunberg-Nissan	37

4.4	RESULTADOS DE VISCOSIDADE DOS COMPONENTES UTILIZADOS	39
4.3	ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MODELOS	40
4.3.1	Análise do desempenho dos modelos nas misturas com VI.....	41
4.3.2	Análise do desempenho dos modelos nas misturas com óleo básico ...	44
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS DURANTE A FASE DE ADIÇÃO DE ÓLEO BÁSICO.....	53
	APÊNDICE B - DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS DURANTE A FASE DE ADIÇÃO DE VI	58
	APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ERROS MAE, RMSE E MAPE DOS MODELOS NA PREDIÇÃO DA VISCOSIDADE COM MISTURAS ENTRE ÓLEO LUBRIFICANTE E VI	63
	APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ERROS MAE, RMSE E MAPE DOS MODELOS NA PREDIÇÃO DA VISCOSIDADE COM MISTURAS ENTRE ÓLEO LUBRIFICANTE E ÓLEO BÁSICO.....	66
	APÊNDICE E – RESULTADOS DE VISCOSIDADES EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS DOS MODELOS DE ARRHENIUS, POWER LAW E GRUNBERG-NISSAN	69

1 INTRODUÇÃO

Os óleos lubrificantes desempenham um papel fundamental na garantia do desempenho adequado e no alongamento da vida útil de motores, transmissões e equipamentos e, por isso, a produção deles é vital para a manutenção de maquinários nos processos produtivos em inúmeras indústrias. Esta importância pode ser vista nos dados de produção de óleo lubrificante, pois segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (2022), a produção no Brasil passou de 1,2 milhões de metros cúbicos, e desde 2016 a produção anual se manteve sempre acima de um milhão de metros cúbicos.

A produção de óleo lubrificante é simples, e consiste em misturar óleo básico com aditivos, cuja quantidade destes podendo variar entre 5 e 30% (Dresel; Mang, 2007, p. 34). Apesar de ser simples, a produção de óleo lubrificante está sujeita a perdas durante o processo, principalmente na etapa de acerto da viscosidade do produto acabado, pois qualquer variação na matéria-prima ou contaminação nas tubulações e tanques pode, potencialmente, alterar as características do produto.

A viscosidade é o aspecto mais importante de um óleo lubrificante, independentemente de sua origem ou finalidade, tanto que o uso de lubrificantes inadequados pode acabar danificando e até inutilizando equipamentos. Portanto, as indústrias de produção de óleo lubrificante devem ser bem rígidas e ter um bom controle de qualidade para se certificar que cada óleo esteja com a viscosidade de acordo com sua especificação e, caso contrário, tentar corrigir o produto para atendê-la. Caso seja necessário diminuir a viscosidade do óleo, é necessário adicionar mais óleo básico ao tanque, e para aumentar a viscosidade é preciso acrescentar mais aditivo.

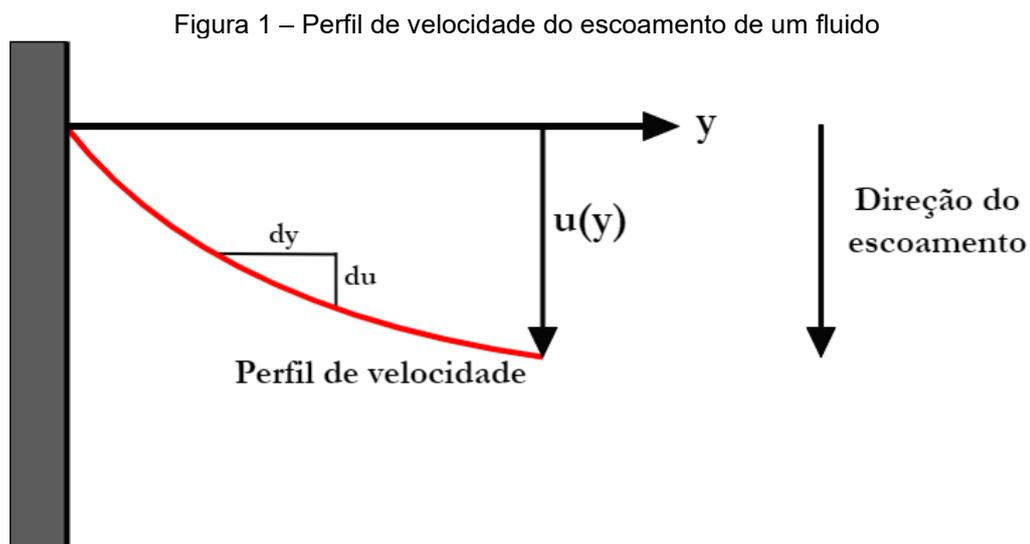
Diversos modelos que tentam prever a viscosidade dinâmica e cinemática da mistura de dois fluídos foram desenvolvidos nos últimos séculos. Neste trabalho, será estudado o desempenho de treze modelos na predição da viscosidade dinâmica e cinemática a 100 °C, através da adição em certas proporções de aditivo e óleo básico mineral e sintético em óleos lubrificantes automotivos e industriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VISCOSIDADE

A viscosidade é uma grandeza física que quantifica a resistência de um fluido ao escoamento. Segundo White (2011, p. 37) “[...] ela determina a taxa de deformação do fluido que é gerada pela aplicação de uma dada tensão de cisalhamento”.

Considerando uma tensão de cisalhamento (τ) sendo aplicado em um fluido newtoniano presente em um plano, como demonstrado na Figura 1, tem-se que τ é proporcional ao gradiente de velocidade du/dy através de uma constante de proporcionalidade μ , mais conhecida como coeficiente de viscosidade ou viscosidade dinâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal relação entre tensão de cisalhamento e gradiente de velocidade pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

No sistema internacional, a viscosidade dinâmica é dada em Pa.s.

Assim como uma propriedade termodinâmica, a viscosidade dinâmica varia de acordo com a pressão (P) e temperatura (T) aplicadas sobre o fluido. Para gases, a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura, visto que o número de colisões

entre as moléculas também vai crescer. Para líquidos ocorre o processo inverso, uma vez que o aumento da temperatura vai diminuir as forças de atração das moléculas, diminuindo assim a viscosidade. Em relação à pressão, na maioria das vezes é preciso ter uma grande diferença de pressão para se constatar uma variação significativa de viscosidade de gases e líquidos, pois em gases as moléculas estão muito distantes e os líquidos são habitualmente considerados incompressíveis (White, 2011, p. 38).

Com isso, surge a viscosidade cinemática (ν), que se trata da razão entre μ e a densidade (ρ) do fluido, ambas nas mesmas condições de P e T. A viscosidade cinemática tem como unidade no sistema internacional m^2/s e pode ser dada pela equação:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

2.2 ÓLEO LUBRIFICANTE

A utilização de óleo lubrificantes vem sendo observada em sociedades ao redor do mundo por milhares de anos. Segundo Pirro e Wessel (2001, p. 4), tem-se registros do uso de graxas de origem animal desde 1400 A.C., que eram utilizadas na lubrificação de rodas de carruagens. No entanto, foi somente no século XIX em que os primeiros usos de produtos de petróleo foram registrados para substituir óleos de origem animal.

As funções primordiais de óleos lubrificantes automotivos e industriais são de reduzir fricção e prevenir o desgaste, entretanto, Caines e Haycock (2004, p. 4) descrevem outras funções, que podem ser encontradas no seguinte quadro:

Quadro 1 – Funções adicionais de óleos lubrificantes automotivos e industriais.

Função	Descrição
Resfriamento	Ajuda na dissipação de calor
Anti-oxidante	Absorve agentes oxidantes que poderiam atacar o objeto lubrificado
Limpeza	Evita o acúmulo de depósitos
Selante	Cria uma película protetora ao redor do objeto lubrificado

Fonte: Adaptado de Caines e Haycock (2004).

Em relação às aplicações dos lubrificantes, classificações de acordo com sua viscosidade foram propostas e são aceitas internacionalmente, sendo o grau ISO vigente para óleos industriais e o grau SAE para óleos para motores e transmissões.

Segundo a norma ISO 3448:1992, são descritas 18 classificações diferentes para lubrificantes líquidos industriais, que vão desde 2 cSt até 2500 cSt (ISO, 1992, p. 2).

Em relação à SAE, durante o século XX publicou normas para classificar óleos lubrificantes de motores e transmissões. Óleos que se encaixam somente em uma classificação SAE são chamados de monoviscosos e os que se encaixam em duas ou mais são chamados de multiviscosos. Óleos multiviscosos apresentam essa característica pois sua formulação apresenta aditivos melhoradores de VI (viscosity index) e/ou óleos básicos com VI naturalmente altos (Dresel; Mang, 2007, p. 197).

Quadro 2 – Classificação SAE J300 de acordo com a viscosidade.

Grau SAE de viscosidade	Viscosidade de partida a baixa temperatura (mPa.s) (CCS)	Viscosidade de bombeamento a baixa temperatura (mPa.s) (MRV)	Viscosidade de baixo cisalhamento a 100°C (mm ² /s)		Viscosidade de alto cisalhamento a 150°C e 10 ⁶ s ⁻¹ (mPa.s)
	Máximo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
0W	6200 a -35°C	60000 a -40°C	3,8	-	-
5W	6600 a -30°C	60000 a -35°C	3,8	-	-
10W	7000 a -25°C	60000 a -30°C	4,1	-	-
15W	7000 a -20°C	60000 a -25°C	5,6	-	-
20W	9500 a -15°C	60000 a -20°C	5,6	-	-
25W	13000 a -10°C	60000 a -15°C	9,3	-	-
20	-	-	5,6	9,3	2,6
30	-	-	9,3	12,5	2,9
40	-	-	12,5	16,3	2,9 ¹
40	-	-	12,5	16,3	3,7 ²
50	-	-	16,3	21,9	3,7
60	-	-	21,9	26,1	3,7

Fonte: Adaptado de Mang e Dresel (2007).

¹ para 0W, 5W e 10W

² para 15W, 20W, 25W e monoviscosos

A viscosidade que é tratada na segunda coluna do Quadro 2 é medida em um equipamento chamado Cold Crank Simulator (CCS), que mede a viscosidade do óleo a uma baixa temperatura e alto cisalhamento, simulando justamente o comportamento do motor durante a partida em um ambiente de baixa temperatura.

Um óleo lubrificante é considerado mineral quando sua formulação contém óleos básicos somente de origem mineral, e em um lubrificante sintético, sua formulação deve conter apenas básicos de origem sintética, enquanto lubrificantes semissintéticos podem conter ambos os tipos de óleos básicos em sua formulação.

A produção de óleo lubrificante é um processo bem simples, pois é necessário somente misturar óleos básicos com aditivos. De preferência, a mistura deve ocorrer em um tanque com agitação e aquecimento, para acelerar a homogeneização dos óleos.

2.2.1 Óleos Básicos

Segundo Pirro e Wessel (2001, p. 13), um óleo básico pode participar entre 70% e 99% na composição de um óleo lubrificante, e pode ser classificado em até 5 grupos de acordo com seu grau API, sendo os dois primeiros óleos básicos classificados como mineral e os três últimos como sintéticos de acordo com a resolução nº 804 da ANP de 20 de dezembro de 2019 (Brasil, 2019, p. 2):

Quadro 3 – Categorias de óleos básicos.

Categoria	Quantidade (%)		Índice de viscosidade
	Saturados	Enxofre	
Grupo I	<90	>0,03	80 – 120
Grupo II	>=90	<=0,03	80 – 120
Grupo III	>=90	<=0,03	>=120
Grupo IV	Polialfaolefinas (PAO's)		
Grupo V	Óleos básicos que não classificados nos grupos de I a IV		

Fonte: Adaptado de Pirro e Wessel (2001).

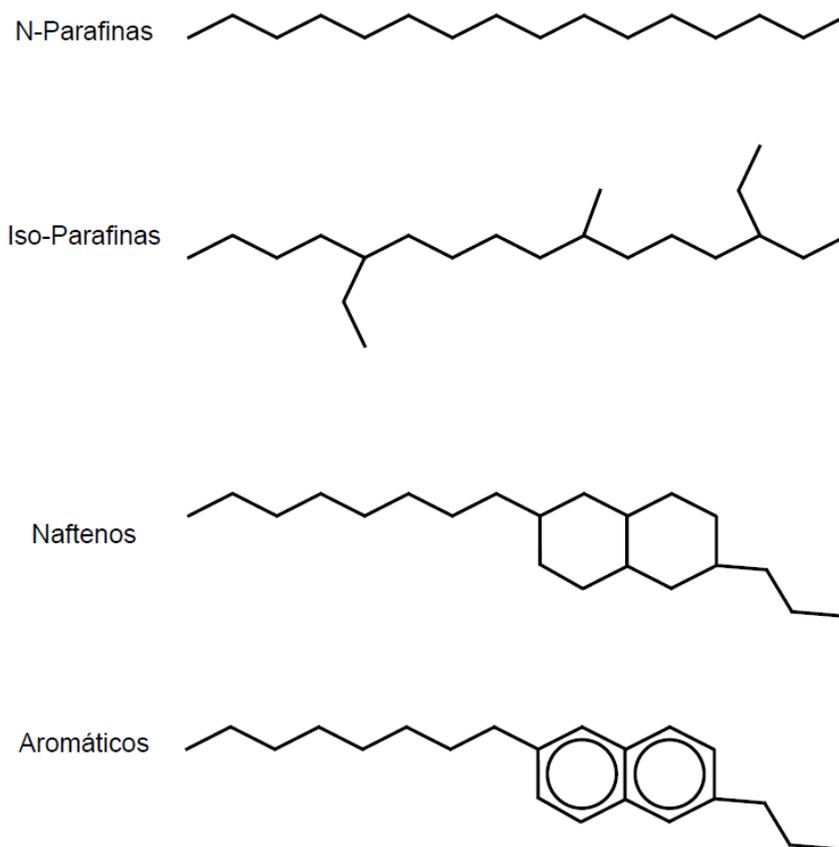
O índice de viscosidade de um óleo mensura o quanto um óleo varia sua viscosidade de acordo com a temperatura. Sabe-se que a viscosidade de um óleo

diminui conforme o aumento da temperatura, logo um óleo com alto VI indica que sua viscosidade varia menos do que um óleo com baixo VI.

Normalmente, óleos refinados fazem parte do grupo I, enquanto óleos hidrocraqueados e desparafinizados cataliticamente fazem parte do grupo II e grupo III, estes diferenciando-se através da severidade do hidrotreatamento (Dresel; Mang, 2007, p. 53).

Os grupos de I a III são constituídos de óleos parafínicos, já o grupo IV é composto de polialfaolefinas, que são obtidas a partir da polimerização de olefinas, e o grupo V é composto por óleos que não se enquadram nos primeiros quatro grupos, como por exemplo: óleos naftênicos, ésteres, poliglicóis, entre outros.

Figura 2 – Algumas cadeias carbônicas de hidrocarbonetos que constituem óleos básicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas últimas décadas, a demanda por óleos básicos sintéticos vem aumentando, isso porque cada vez mais é exigido desempenho de óleos lubrificantes, e os da categoria sintético favorecem com maior intensidade a economia de combustível, a

menor perda por evaporação, um maior intervalo de tempo ou quilometragem entre trocas e poluem menos por ter menos quantidade de enxofre em sua composição.

2.2.2 Aditivos

Para um óleo lubrificante automotivo desempenhar como o esperado, é necessário complementar os óleos básicos com aditivos. Segundo Rudnick (2008, p. 458), as principais classes de aditivos são: detergentes, dispersantes, antidesgaste, antioxidantes, modificadores de viscosidade, abaixadores de ponto de fluidez e inibidores de espuma.

Os aditivos detergentes têm a função de neutralizar compostos ácidos que são formados durante a combustão. Por isto, alguns detergentes podem atuar como antioxidantes, dependendo da natureza de seus grupos funcionais. Esta classe contém metais como cálcio, magnésio e sódio.

Os aditivos dispersantes têm como objetivo manter as partículas de sujeira e detritos em suspensão no óleo. Eles consistem em moléculas que possuem regiões hidrofílicas e hidrofóbicas. Os principais dispersantes utilizados atualmente são os de succinimida e Mannich.

Em relação aos aditivos antidesgaste, eles são compostos basicamente de ZDDP's (Zinc Dialkyldithiophosphate). O ZDDP desempenha sua função através de sua decomposição, pois os produtos de sua degradação formam um filme na superfície do metal, rico em fósforo e oxigênio, reduzindo assim o desgaste nas superfícies metálicas.

Como óleos lubrificantes podem estar em contato com oxigênio e trabalhar em alta temperatura, eles estão suscetíveis a oxidação. Com isso, é necessário a presença de aditivos com função antioxidante como: inibidores a base de nitrogênio, a base de oxigênio, ZDDP's e decompositores de peróxidos de hidrogênio, que são compostos a base de enxofre e fósforo.

Além disso, segundo Rudnick (2008, p. 296) os aditivos conhecidos como modificadores de viscosidade ou melhoradores de índice de viscosidade são os responsáveis por manter a viscosidade do lubrificante na faixa ideal na maior faixa

possível de temperatura. Os mais populares utilizados são os OCP's (Olefin Copolymer), ou seja, polietileno de copolímero de olefina.

Ademais, óleos lubrificantes contêm pequenas quantidades de ceras, apesar disso elas ainda podem formar redes de cristais de cera que não deixam o óleo fluir quando ele atinge baixas temperaturas. Portanto, é necessário o acréscimo de aditivos abaixadores de ponto de fluidez, que atuam na inibição de redes de cristais, abaixando ainda mais a temperatura de ponto de fluidez do óleo lubrificante. Os mais utilizados são aditivos a base de polialquilmecrilatos e geralmente estão presentes em uma quantidade menor que 0,5% na formulação de lubrificantes.

Por fim, a presença de espuma no óleo reduz seu desempenho, pois reduz a pressão do óleo e pode causar problemas de cavitação. Por isso, a presença de inibidores de espuma é essencial, uma vez que eles atuam diminuindo a tensão superficial da interface da bolha de ar com o óleo, facilitando a decomposição das bolhas.

No que se refere aos aditivos óleos lubrificantes industriais, eles também possuem as funções de antioxidação, antidesgaste e modificador de viscosidade. Além disso, segundo Rudnick (2008, p. 496), eles podem ter as funções de modificador de fricção, impermeabilizante e de aderência.

Os modificadores de fricção entram em contato com o metal e reduzem a fricção entre as partes móveis. Os impermeabilizantes atuam se adsorvendo nos materiais de vedação, como borracha, e as previnem de rachar e deteriorar. Os aditivos de aderência ajudam na fixação do lubrificante na superfície do metal, pois situações como movimentações do equipamento podem tirar o lubrificante de uma área dele.

2.3 MODELOS DE PREDIÇÃO DE VISCOSIDADE

Segundo Bloomfield e Dewan (1971), a capacidade de prever a viscosidade resultante de mistura líquidas vem sendo alvo de estudo durante muito tempo. Normalmente, a viscosidade apresenta um comportamento não linear. Por isso, a maioria dos modelos apresenta logaritmos ou duplos logaritmos, e relaciona propriedades dos componentes puros juntamente com seus parâmetros

termodinâmicos que representam a interação entre eles. Entretanto, neste trabalho, como forma simplificação, na maioria dos casos, esses parâmetros serão desprezados, pois trabalharemos com produtos de petróleo e polímeros modificadores de viscosidade, que por natureza são majoritariamente apolares. Tal simplificação pode fazer que os erros obtidos fiquem ligeiramente maiores, pois apesar dos compostos serem majoritariamente apolares, ainda existem interações, mesmo que pequenas, entre as moléculas dos óleos.

Neste trabalho, foi estudado o desempenho de 13 modelos, sendo 11 deles modelos preditivos e 2 correlativos. Os modelos correlativos são os que possuem um parâmetro a ser ajustado, enquanto os preditivos não possuem esses parâmetros.

2.3.1 Modelo de Kendall-Monroe

O modelo de Kendall e Monroe (1917) foi proposto a partir do estudo com sistemas de hidrocarbonetos aromáticos, e descrito pela Equação 3.

$$\mu^{1/3} = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i^{1/3} \quad (3)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura e μ_i e x_i são, respectivamente, a viscosidade dinâmica e fração mássica do componente i .

2.3.2 Modelo ASTM 7152-11

O modelo proposto pela norma ASTM 7152-11 foi desenvolvido para ser utilizado em misturas que envolvem óleos básicos, combustíveis, resíduos de querosene, óleos brutos e produtos relacionados. A norma não especifica se deve ser usado fração mássica ou volumétrica, portanto neste trabalho este modelo será avaliado se utilizando fração mássica. O modelo é descrito pelas Equações 4, 5, 6 e 7 (ASTM, 2011).

$$W_A = \log[\log(v_A + 0,7)] \quad (4)$$

$$W_B = \log[\log(v_B + 0,7)] \quad (5)$$

$$W_{blend} = x_A W_A + x_B W_B \quad (6)$$

$$\nu = 10^{10 W_{blend}} - 0,7 \quad (7)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática final da mistura, ν_A é a viscosidade cinemática do componente leve, ν_B é a viscosidade cinemática do componente pesado, x_A e x_B são, respectivamente, a fração mássica do componente leve e pesado e W_A , W_B e W_{blend} são variáveis adimensionais intermediárias que estão presentes no modelo.

2.3.3 Modelo Linear

Apesar de, geralmente, a viscosidade não apresentar um comportamento linear, o modelo linear será avaliado neste trabalho, para verificar seu desempenho na predição da viscosidade com os óleos a serem analisados. O modelo linear é descrito pela Equação 8.

$$\mu = \sum_{i=1}^n \phi_i \mu_i \quad (8)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura e μ_i e Φ_i são, respectivamente, a viscosidade dinâmica e fração volumétrica do componente i .

2.3.4 Modelo de Arrhenius

O modelo proposto por Arrhenius (1887) foi inicialmente voltado para predição de viscosidade da mistura de substância com a água, entretanto ele também apresenta bons resultados na predição com hidrocarbonetos. O modelo é descrito pela Equação 9.

$$\log(\mu) = \sum_{i=1}^n \phi_i \log(\mu_i) \quad (9)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura e μ_i e Φ_i são, respectivamente, a viscosidade dinâmica e fração volumétrica do componente i .

2.3.5 Modelo de Bingham

O modelo proposto por Bingham (1913) faz uma analogia entre viscosidade e resistência elétrica, ou seja, o inverso da viscosidade é o somatório dos inversos das viscosidades dos componentes. O modelo é descrito pela Equação 10.

$$\frac{1}{\mu} = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{\mu_i} \quad (10)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura e μ_i e ϕ_i são, respectivamente, a viscosidade dinâmica e fração volumétrica do componente i .

2.3.6 Modelo de Cragoe

O modelo proposto por Cragoe (1933) foi desenvolvido para misturas entre óleos pesados e solvente, e é descrito pelas Equações 11, 12 e 13.

$$L_i = \frac{1}{\ln(\mu_i) - \ln(0,0005)} \quad (11)$$

$$L = \sum_{i=1}^n x_i L_i \quad (12)$$

$$\mu = 0,0005 \times e^{\frac{1}{L}} \quad (13)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura e μ_i e x_i são, respectivamente, a viscosidade dinâmica e fração mássica do componente i . Além disso, L e L_i são variáveis adimensionais intermediárias que compõem o modelo.

2.3.7 Modelo de Centeno

O modelo proposto por Centeno (2011) tem a mesma estrutura do modelo apresentado pela norma ASTM 7152-11, entretanto o modelo de Centeno utiliza viscosidade dinâmica ao invés da cinemática. O modelo é descrito pelas Equações 14.a, 14.b, 15 e 16.

$$W_A = \log[\log(\mu_A + 1)] \quad (14.a)$$

$$W_B = \log[\log(\mu_B + 1)] \quad (14.b)$$

$$W_{blend} = x_A W_A + x_B W_B \quad (15)$$

$$\mu = 10^{10 W_{blend}} - 1 \quad (16)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura, μ_A é a viscosidade dinâmica do componente leve, μ_B é a viscosidade dinâmica do componente pesado, x_A e x_B são, respectivamente, a fração mássica do componente leve e pesado e W_A , W_B e W_{blend} são variáveis adimensionais intermediárias que estão presentes no modelo.

2.3.8 Modelo de Refutas

Maples (2000) descreve o modelo de Refutas. Nele é utilizado um termo intermediário chamado VBI, que nada mais é do que o Índice de viscosidade de mistura (Viscosity Blending Index). O modelo de Refutas é descrito pelas Equações 17, 18 e 19.

$$VBI_i = 10,975 + 14,535 \times \ln[\ln(v_i + 0,8)] \quad (17)$$

$$VBI = \sum_{i=1}^n x_i VBI_i \quad (18)$$

$$v = e^{e^{\frac{VBI-10,975}{14,535}}} - 0,8 \quad (19)$$

Onde v é a viscosidade cinemática final da mistura, v_i e x_i são, respectivamente, a viscosidade cinemática e fração mássica do componente i e VBI_i e VBI são variáveis adimensionais intermediárias que estão presentes no modelo.

2.3.9 Modelo de Chevron

Riazi (2005) aborda em seu trabalho o modelo proposto pela Chevron Research Company, e nele é utilizado o mesmo termo VBI do modelo de Refutas, entretanto no modelo de Chevron ele é calculado de outra maneira. Este modelo é descrito pelas Equações 20, 21 e 22.

$$VBI_i = \frac{\log(v_i)}{3 + \log(v_i)} \quad (20)$$

$$VBI = \sum_{i=1}^n \phi_i VBI_i \quad (21)$$

$$v = 10^{\frac{3 \times VBI}{1 - VBI}} \quad (22)$$

Onde v é a viscosidade cinemática final da mistura, v_i e Φ_i são, respectivamente, a viscosidade cinemática e fração volumétrica do componente i e VBI_i e VBI são variáveis adimensionais intermediárias que estão presentes no modelo.

2.3.10 Modelo do Fator de mistura

Como visto em Farah (2005), alguns modelos são desenvolvidos por empresas e foram divulgados de forma não referenciada, e entre eles estão os modelos de fator de mistura e índice de mistura. O modelo de fator de mistura é descrito pelas Equações 23, 24 e 25.

$$FM_i = \frac{\ln(v_i)}{\ln(1000 \times v_i)} \quad (23)$$

$$FM = \sum_{i=1}^n \phi_i FM_i \quad (24)$$

$$v = e^{\frac{FM \times \ln(1000)}{1 - FM}} \quad (25)$$

Onde v é a viscosidade cinemática final da mistura, v_i e Φ_i são, respectivamente, a viscosidade cinemática e fração volumétrica do componente i e FM_i e FM são variáveis adimensionais intermediárias que estão presentes no modelo.

2.3.11 Modelo de Índice de mistura

O modelo de índice de mistura é um modelo empírico não linear utilizado para frações de petróleo e utilizada para misturas não ideais. O modelo é descrito pelas Equações 26, 27 e 28.

$$IM_i = 41,10743 - 49,08252 \times \log[\log(v_i + 0,8)] \quad (26)$$

$$IM = \sum_{i=1}^n \phi_i IM_i \quad (27)$$

$$\nu = 10^{10 \frac{41,10743 - IM}{49,08252}} - 0,8 \quad (28)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática final da mistura, ν_i e Φ_i são, respectivamente, a viscosidade cinemática e fração volumétrica do componente i e IM_i e IM são variáveis adimensionais intermediárias que estão presentes no modelo.

2.3.12 Modelo Power Law

O modelo Power Law é uma variação do modelo de Kendall-Monroe, uma vez que os termos $\frac{1}{3}$ de Kendall-Monroe são substituídos por um termo p , que é o parâmetro a ser ajustado e, portanto, faz do modelo Power Law uma correlação. Este modelo é descrito pela Equação 29.

$$\mu^p = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i^p \quad (29)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura, μ_i é a viscosidade dinâmica do componente i , x_i é a fração mássica do componente i e p é o parâmetro a ser ajustado.

2.3.13 Modelo de Grunberg-Nissan

Grunberg e Nissan (1949) propuseram uma correlação inspirada no modelo de Arrhenius. Em seu trabalho, constataram que o modelo de Arrhenius poderia ter desvios negativos e positivos, portanto adicionaram um termo G , que deve ser ajustado. Apesar de se basear em Arrhenius, Grunberg-Nissan utiliza frações mássicas ao invés de frações volumétricas. O modelo de Grunberg-Nissan é descrito pela Equação 30.

$$\log(\mu) = \sum_{i=1}^n x_i \log(\mu_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n x_i x_j G \quad (30)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica final da mistura, μ_i é a viscosidade dinâmica do componente i , x_i e x_j são a fração mássica do componente i e j , e G é o parâmetro a ser ajustado.

2.4 METODOLOGIA DE REGRESSÃO

As metodologias de regressão são algoritmos que são compostos por um conjunto de técnicas matemáticas utilizadas para modelar a relação entre variáveis, sendo frequentemente utilizadas em análise de dados.

A análise de regressão pode ser utilizada em duas principais situações, ela pode ser utilizada para analisar o quão bom um modelo é para fazer previsões, e pode ser usada para estudar a relação entre as variáveis independentes e dependentes de um modelo.

2.4.1 Levenberg-Marquardt

Neste trabalho, as regressões necessárias para os modelos Power law e Grunberg-Nissan foram feitas utilizando o método de Levenberg-Marquardt.

O método de Levenberg-Marquardt é uma variação do método de Gauss-Newton, que trabalha minimizando a soma dos quadrados e presume que a função objetivo é aproximadamente quadrática quando se aproxima da solução ideal e é descrito pela Equação 31 (GAVIN, 2016, p. 2).

$$(J^T(x_k)J(x_k))d_k = -J^T(x_k)R(x_k) \quad (31)$$

Onde $J(x_k)$ é a matrix Jacobiana da função objetivo em relação à variável x_k , e $J^T(x_k)$ é sua transposta. Já d_k é o incremento e $R(x_k)$ é o valor da função objetivo em x_k .

Entretanto, este método de Gauss-Newton possui uma falha, que a possibilidade do surgimento de autovalores negativos, que podem levar a problemas durante a iteração, como a falta de convergência ou a convergência para um mínimo não desejado.

Levenberg (1944) propôs a introdução de um termo $\lambda_k \geq 0$ na diagonal $J^T(x_k)J(x_k)$ no sistema Gauss-Newton. Adicionar este termo de regularização garante que a matriz resultante seja sempre pelo menos positiva. Esse novo modelo com esse termo

adicional é conhecido como modelo de Levenberg-Marquardt, e é descrito pela Equação 32.

$$(J^T(x_k)J(x_k) + \lambda_k I)d_k = -J^T(x_k)R(x_k) \quad (32)$$

A adição do termo λ_k foi importante devido ao fato de que ele influencia na direção e no tamanho do passo, fazendo com que não seja necessário se buscar de forma linear o tamanho ideal do passo a ser dado em cada iteração.

O parâmetro λ_k inicializado com um valor grande, portanto as primeiras atualizações são pequenas e na direção da “descida” mais íngreme. Se uma iteração acontecer e o resultado for uma aproximação pior, o valor do parâmetro é aumentado. À medida que a solução vai melhorando, o parâmetro diminui, fazendo com que o método Levenberg-Marquardt acabe se aproximando do método Gauss-Newton, e a solução normalmente acelera até o mínimo local (GAVIN, 2016, p. 3).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO DOS COMPONENTES A SEREM UTILIZADOS

As análises que foram realizadas neste trabalho, foram executadas no laboratório da empresa TotalEnergies, localizado na cidade de Pindamonhangaba/SP. Portanto, por motivos de confidencialidade, não serão revelados os nomes dos óleos, assim como sua finalidade.

A identificação e classificação de cada óleo que foi utilizado e estudado neste trabalho se encontram nos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Óleos que foram adicionados nos óleos lubrificantes.

Identificação do óleo	Categoria
OBM	Óleo básico mineral
OBS	Óleo básico sintético
VI	Aditivo melhorador de índice de viscosidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5 – Óleos lubrificantes que foram estudados.

Identificação do óleo	Categoria	Classificação
S-5W30	Sintético	SAE 5W30
S-15W40	Sintético	SAE 15W40
S-15W50	Sintético	SAE 15W50
SD-15W40	Sintético	SAE 15W40
SD-10W30	Sintético	SAE 10W30
S-SC	Sintético	Automotivo e sem classificação
S-100	Sintético	ISO VG 100
M-SC	Mineral	Industrial e sem classificação
M-460	Mineral	ISO VG 460
M-680	Mineral	ISO VG 680
M-85W140	Mineral	SAE 85W140
M-320	Mineral	ISO VG 320
M-68	Mineral	ISO VG 68
M-220	Mineral	ISO VG 220

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto no quadro 5, houve dois óleos 15W40 neste trabalho, mas apesar de terem a mesma classificação, estes óleos têm finalidades distintas. Além disso, foram escolhidos 14 óleos lubrificantes no total, sendo 7 automotivos e 7 industriais.

Com isso, estabeleceu-se que o óleo básico mineral seria adicionado aos óleos minerais, e o básico sintético aos lubrificantes sintéticos e o aditivo em todos os 14.

3.2 PREPARO DAS MISTURAS

Com o objetivo de se analisar a influência da adição de óleos básicos e aditivo em óleos lubrificantes, foram preparadas misturas com diferentes composições de óleo adicionado e lubrificante. A Tabela 1 descreve os teores utilizados, assim como suas massas medidas. A massa total de cada mistura foi fixada em 25 g.

Tabela 1 – Dados de teor e massa utilizados neste trabalho.

Teor do óleo adicionado (%)	Massa de óleo adicionado (g)	Massa de óleo lubrificante (g)
0,5	0,125	24,875
2,0	0,500	24,500
3,5	0,875	24,125
5,0	1,250	23,750
6,5	1,625	23,375
8,0	2,000	23,000
9,5	2,375	22,625

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada óleo lubrificante, foi realizada uma mistura para cada teor, ou seja, foram feitas 7 misturas adicionando-se óleo básico e 7 misturas adicionando-se aditivo, e elas foram realizadas em uma balança da empresa OHAUS, modelo AP120, com resolução de 0,1 mg, repetibilidade de 0,1 mg e linearidade de $\pm 0,2$ mg.

Após a pesagem, as misturas foram mantidas sob agitação e aquecimento a 60 °C, para uma homogeneização mais efetiva.

3.3 ANÁLISE DA VISCOSIDADE E DENSIDADE DAS MISTURAS

As medições de viscosidade dinâmica, viscosidade cinemática e massa específica, todas a 100 °C, foram realizadas em um viscosímetro cinemático automático da empresa Anton Paar, modelo SVM 3001. Segundo o fabricante, a medição de viscosidade deste equipamento tem uma repetibilidade de 0,1%, uma reprodutibilidade de 0,35% e estabilidade de 0,15% no modo rápido, e a medição de densidade deste equipamento tem repetibilidade de 0,00005 g/cm³, uma reprodutibilidade de 0,0001 g/cm³ e estabilidade de 0,00050 g/cm³ no modo rápido.

A célula de medição contém um tubo que gira em velocidade constante e é preenchido com a amostra, enquanto um rotor de medição com um ímã integrado flutua livremente na amostra. As forças de cisalhamento da amostra giram o rotor, enquanto a força magnética do ímã retarda sua rotação. Quando o rotor atinge a velocidade de equilíbrio, é calculado a viscosidade dinâmica e densidade. A viscosidade cinemática é automaticamente calculada a partir da viscosidade dinâmica e da densidade da amostra.

3.4 CÁLCULO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA

As misturas foram preparadas com base em massa, portanto os teores de óleo adicionado, que estão na tabela 1, também são as frações mássicas. Para convertê-las em fração volumétrica, que é necessária para alguns modelos, utilizou-se a Equação 32.

$$\phi_i = \frac{x_i \rho_o}{(1 - x_i) \rho_s + x_i \rho_o} \quad (33)$$

Os termos Φ_i e x_i são as frações volumétricas e mássicas do componente i , enquanto ρ_o e ρ_s são as densidades a 100 °C do óleo lubrificante e do componente adicionado.

3.5 CÁLCULOS DOS VALORES TEÓRICOS DOS MODELOS PREDITIVOS

Para o cálculo dos valores teóricos dos modelos, foi utilizada a linguagem Python. Através da IDE Pycharm, foi criado um algoritmo que calculava os valores de viscosidade de cada teor de mistura para cada modelo. Portanto, para cada óleo lubrificante, o código já fornece todos os valores teóricos de cada modelo para cada teor de óleo adicionado. As entradas desse código eram as densidades, viscosidades dinâmicas e cinemáticas dos componentes puros, que foram medidas anteriormente no viscosímetro. Para isso, as bibliotecas utilizadas nesse código foram o pandas e numpy.

3.6 CÁLCULOS DAS REGRESSÕES DOS MODELOS CORRELATIVOS

Para os modelos Power law e Grunberg-Nissan é necessário realizar uma regressão não-linear para se obter os parâmetros ideais de cada modelo. Para isso, utilizou a linguagem Python através do programa Jupyter Notebook. Neste código utilizou-se as bibliotecas pandas, matplotlib, numpy e scipy, sendo este o responsável pela regressão, através da função “curve_fit”, que utiliza o método de Levenberg-Marquardt para encontrar o melhor valor para os parâmetros. As entradas do código eram as densidades, viscosidades dinâmicas e cinemáticas dos componentes puros e os dados teóricos calculados anteriormente.

Encontrado os melhores parâmetros para cada série de adição de óleo básico e série de adição de aditivo em cada óleo lubrificante, calculou-se a média dos parâmetros encontrados para adição de básico e para os encontrados com a adição de aditivo. Isto porque óleos básicos e aditivos têm composições e propriedades significativamente distintas, portanto cada um deles afeta o óleo lubrificante de forma diferente.

Com os parâmetros médios encontrados, repetiu-se o procedimento 3.5, para se encontrar os valores teóricos de viscosidade dos modelos Power law e Grunberg-Nissan para cada óleo lubrificante.

3.7 CÁLCULOS DOS ERROS

Neste trabalho, para analisar o desempenho de cada modelo na predição da viscosidade, utilizou-se três tipos de erro: o erro absoluto médio (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro percentual absoluto médio (MAPE). Esses erros são descritos pelas Equações 34, 35 e 36.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (34)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (35)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100\% \quad (36)$$

O termo n se refere ao número de amostras, enquanto os termos y_i e \hat{y}_i se referem aos valores reais e teóricos, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DAS REGRESSÕES DOS MODELOS CORRELATIVOS

As regressões dos modelos correlativos foram divididas em 2 grupos: o primeiro grupo são as misturas feitas adicionando-se óleo básico, seja OBS ou OBM, enquanto o segundo grupo são as misturas em que foram adicionadas VI.

4.1.2 Resultados da regressão do modelo Power Law

Os parâmetros p do modelo de Power Law encontrados na regressão dos dados obtidos nas misturas com óleo básico estão presentes na Tabela 2, enquanto os resultados nas misturas com VI estão na Tabela 3.

Tabela 2 – Resultados da regressão do modelo Power law referente às misturas de lubrificante com óleo básico.

Identificação	p	Covariância
S-15W40	-0,06718	3,0503E-04
S-5W30	0,30579	1,5779E-03
S-15W50	-0,12591	1,2501E-03
SD-15W40	-0,02487	1,6606E-04
SD-10W30	-0,06044	1,2871E-03
M-SC	-0,06104	1,9552E-04
M-85W140	-0,12396	4,9157E-04
M-460	-0,13658	3,9588E-05
M-680	-0,11766	3,9725E-04
S-100	-0,76236	3,5731E-04
M-320	-0,15180	1,3069E-05
M-68	0,05236	3,0439E-04
S-SC	0,08654	8,4333E-04
M-220	-0,36444	5,0942E-03
Média	-0,11082	8,8017E-04
Desvio Padrão	0,23940	1,3099E-03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Resultados da regressão do modelo Power law referente às misturas de lubrificante com VI.

Identificação	p	Covariância
S-15W40	0,09160	6,9778E-07
S-5W30	0,08259	9,4580E-07
S-15W50	0,07790	3,5696E-05
SD-15W40	0,10042	1,4654E-06
SD-10W30	0,05750	3,1018E-05
M-SC	0,07984	1,1494E-05
M-85W140	0,07862	8,4779E-05
M-460	0,07955	1,1007E-05
M-680	0,03666	3,4032E-05
S-100	0,10078	1,0948E-05
M-320	0,07345	9,6238E-06
M-68	0,12005	1,1286E-06
S-SC	0,09829	8,3548E-05
M-220	0,05537	8,1698E-05
Média	0,08090	2,8434E-05
Desvio Padrão	0,02144	3,2091E-05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto nas Tabelas 2 e 3, a covariância em todos os casos foram bem próximas de zero, mostrando que a relação entre a variável dependente e independente não é linear, fato este que já era esperado.

O desvio padrão em ambos os casos foram elevados, demonstrando que viscosidade dos lubrificantes reagiam de forma variada à adição dos componentes.

4.1.3 Resultados da regressão do modelo Grunberg-Nissan

Os parâmetros G do modelo de Grunberg-Nissan encontrados na regressão dos dados obtidos nas misturas com óleo básico estão presentes na tabela 4, enquanto os resultados nas misturas com VI estão na Tabela 5.

Tabela 4 – Resultados da regressão do modelo Grunberg-Nissan referente às misturas de lubrificante com óleo básico.

Identificação	G	Covariância
S-15W40	-0,0023	3,9787E-07
S-5W30	0,0041	2,7708E-07
S-15W50	-0,0085	1,7694E-07
SD-15W40	-0,0014	9,5319E-08
SD-10W30	-0,0023	6,2399E-07
M-SC	-0,0012	6,8831E-07
M-85W140	-0,0058	9,8391E-06
M-460	-0,0100	1,0191E-05
M-680	-0,0099	2,4017E-05
S-100	-0,0130	1,3107E-05
M-320	-0,0092	6,7451E-06
M-68	0,0005	4,9243E-09
S-SC	0,0006	1,2981E-07
M-220	-0,0212	2,4833E-06
Média	-0,0057	4,9126E-06
Desvio Padrão	0,0067	7,1479E-06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Resultados da regressão do modelo Grunberg-Nissan referente às misturas de lubrificante com VI.

Identificação	G	Covariância
S-15W40	0,0457	8,2451E-05
S-5W30	0,0509	8,5497E-05
S-15W50	0,0302	7,7356E-05
SD-15W40	0,0481	1,0145E-04
SD-10W30	0,0276	6,1090E-05
M-SC	0,0369	4,1286E-05
M-85W140	0,0248	5,7015E-05
M-460	0,0228	2,5992E-05
M-680	0,0098	1,5381E-06
S-100	0,0567	9,4265E-05
M-320	0,0249	1,9858E-05
M-68	0,0775	1,9763E-04
S-SC	0,0603	3,1724E-04
M-220	0,0178	6,1297E-05
Média	0,0381	8,7426E-05
Desvio Padrão	0,0190	8,1088E-05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como visto no modelo de Power law, a covariância em Grunberg-Nissan em todos os casos também foi bem próxima de zero, mostrando que a relação entre a variável dependente e independente não é linear, fato este que já era esperado.

O desvio padrão em Grunberg-Nissan teve um comportamento semelhante com o modelo Power law, onde o desvio padrão nas misturas em que foi adicionado óleo básico foi maior que a média, em módulo, e onde foi adicionado VI o desvio padrão não chegou a 50% do valor da média.

4.4 RESULTADOS DE VISCOSIDADE DOS COMPONENTES UTILIZADOS

Com auxílio do viscosímetro descrito na seção 3.3, mediu-se a viscosidade dinâmica, cinemática e densidade, todos a 100 °C, dos componentes que foram estudados neste trabalho. Os resultados dessas medições estão na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados das medições dos componentes “puros” utilizados no trabalho.

Óleo	μ (cP)	ν (cSt)	ρ (g/cm ³)
OBM	4,2219	5,1672	0,81706
OBS	3,5136	4,4496	0,78964
MV	659,85	809,77	0,81486
S-5W30	7,3462	9,2559	0,79368
S-15W40	10,985	13,535	0,81160
S-15W50	14,613	17,970	0,81319
SD-10W30	9,7813	12,006	0,81470
SD-15W40	11,847	14,362	0,82489
S-100	9,4763	11,578	0,81847
S-SC	6,4637	8,0803	0,79993
M-220	15,438	18,428	0,83775
M-85W140	21,071	24,762	0,85094
M-SC	13,003	15,659	0,83039
M-68	7,4157	9,0304	0,82119
M-320	21,547	25,287	0,85210
M-460	26,407	30,892	0,85482
M-680	34,673	40,535	0,85538

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que 1 cP equivale a 1 mPa.s e 1 cSt equivale a 1 mm²/s.

Como pode-se notar na Tabela 6, tem-se uma grande variedade de óleos lubrificantes neste trabalho, cujas viscosidades dinâmicas variam entre 6,4637 cP e 34,673 cP e viscosidades cinemáticas variam entre 8,0803 cSt e 40,535 cSt.

4.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MODELOS

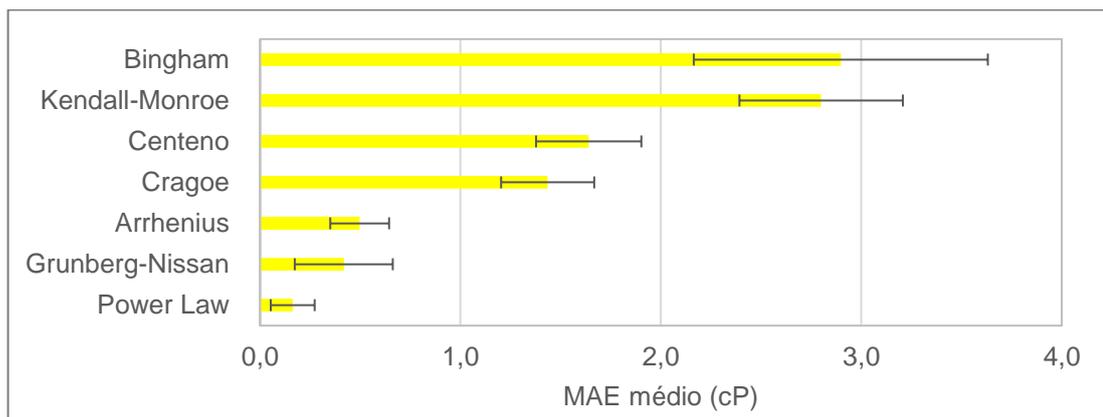
Na análise dos modelos descritos na seção 2.3, foi considerado que o parâmetro p do modelo Power law tem o valor de -0,11082 para a análise das misturas com óleo básico e 0,08090 para a análise das misturas com VI. Para Grunberg-Nissan, foram considerados os valores para G como sendo -0,0057 para as misturas com óleo básico e 0,0381 para as misturas com VI. Tais valores são apenas os valores médios dos parâmetros encontrados na seção 4.1.2 e 4.1.3.

4.3.1 Análise do desempenho dos modelos nas misturas com VI

Com os dados experimentais e teóricos de viscosidade, foi efetuado os cálculos dos erros MAE, RMSE e MAPE. O valor de cada erro para cada modelo pode ser encontrado nos Apêndices C e D.

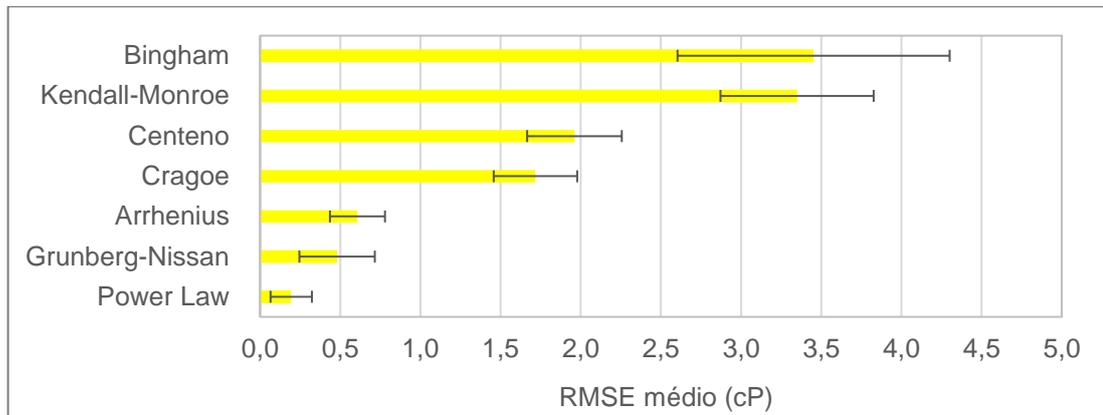
Os valores médios e desvio padrão de MAE, RMSE e MAPE estão descritos nas Figuras 3, 4 e 5. O modelo linear não está presente nos gráficos, visto que seus valores de erro resultaram em valores muito grandes. Os valores médios de MAE, RMSE e MAPE do modelo linear na predição de viscosidade dinâmica foram de 29,023 cP, 33,770 cP e 178,49%.

Figura 3 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.



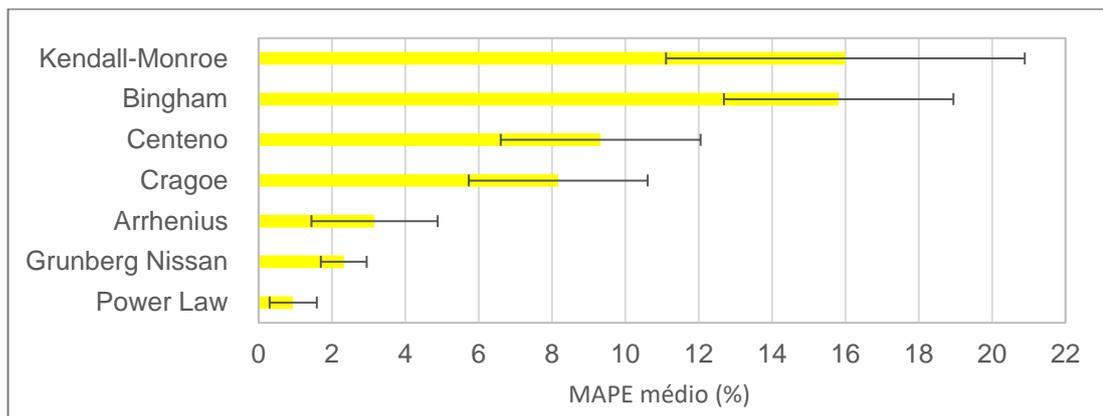
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sobre os modelos que preveem a viscosidade dinâmica, pode-se dizer que os modelos de Arrhenius, Power law e Grunberg-Nissan foram os melhores em relação aos outros. Isto se deve ao fato de que seus erros médios e seus desvios padrões associados foram os menores em relação aos outros modelos. Além disso, apesar dos parâmetros dos modelos correlativos apresentarem um desvio padrão relativamente alto, como visto nas seções 4.1.2 e 4.1.3, eles tiveram um desempenho melhor do que outros 10 modelos, incluindo os que estimam a viscosidade cinemática.

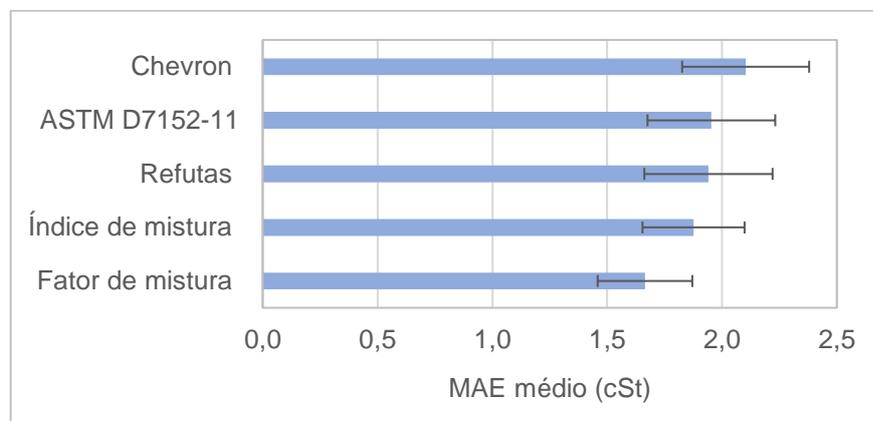
Tais resultados são semelhantes aos encontrados na literatura. Em Gao e Li (2011), o modelo de Arrhenius se mostrou como sendo o melhor entre os modelos preditivos, enquanto o modelo correlativo desempenhou melhor do que Arrhenius.

Além disso, em Centeno *et al* (2011), os modelos correlativos apresentaram um erro menor do que os demais.

Os dados experimentais e teóricos de viscosidade dinâmica e cinemática dos modelos de Arrhenius, Power law e Grunberg-Nissan estão presentes no Apêndice E.

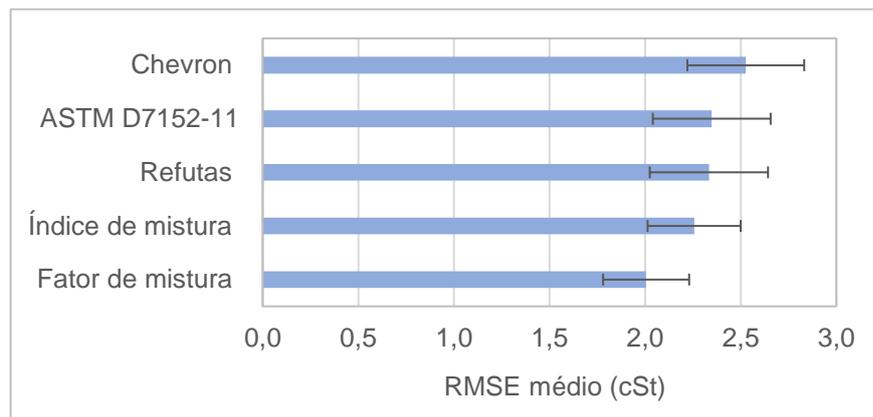
As informações sobre os erros na predição da viscosidade cinemática na mistura entre VI e óleo lubrificante estão nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.



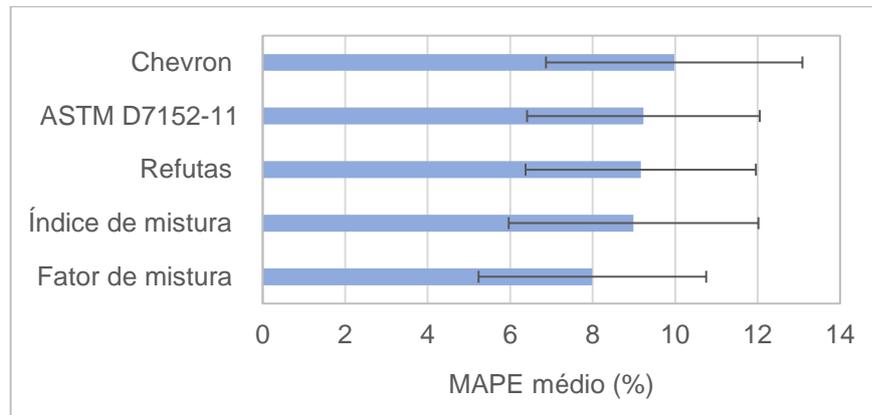
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre aditivo VI e óleo lubrificante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sobre os modelos que estimam a viscosidade cinemática, de acordo com as Figuras 6, 7 e 8, vemos que não é possível afirmar conclusivamente qual é o melhor e nem qual é o pior modelo, visto que todas as barras de desvio padrão se sobrepõem. Ademais, os modelos que tentam prever a viscosidade cinemática têm erros médios maiores e são menos consistentes do que os modelos de Arrhenius, Power law e Grunberg-Nissan.

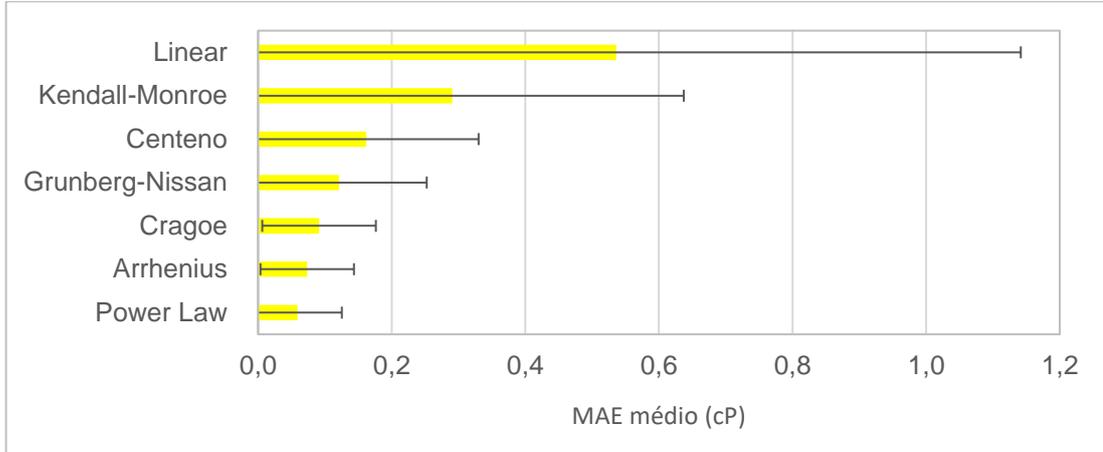
4.3.2 Análise do desempenho dos modelos nas misturas com óleo básico

Nesta etapa, foram adicionados OBS nos óleos lubrificantes sintéticos e OBM nos lubrificantes minerais.

Com os dados experimentais e teóricos de viscosidade, foi efetuado os cálculos dos erros MAE, RMSE e MAPE. O valor de cada erro pode ser encontrado no Apêndice C e D.

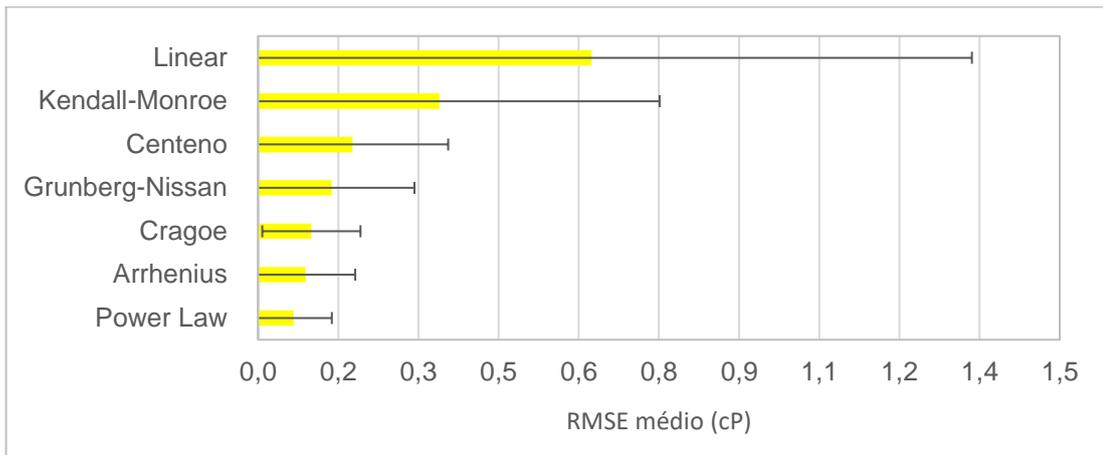
Os valores médios e desvio padrão de MAE, RMSE e MAPE estão descritos nas Figuras de 9 a 14. O modelo de Bingham não está presente nos gráficos, visto que seus valores de erro resultaram em valores muito grandes. Os valores médios de MAE, RMSE e MAPE do modelo linear na predição de viscosidade dinâmica foram de 1,0910 cP, 1,2051 cP e 5,88%.

Figura 9 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.



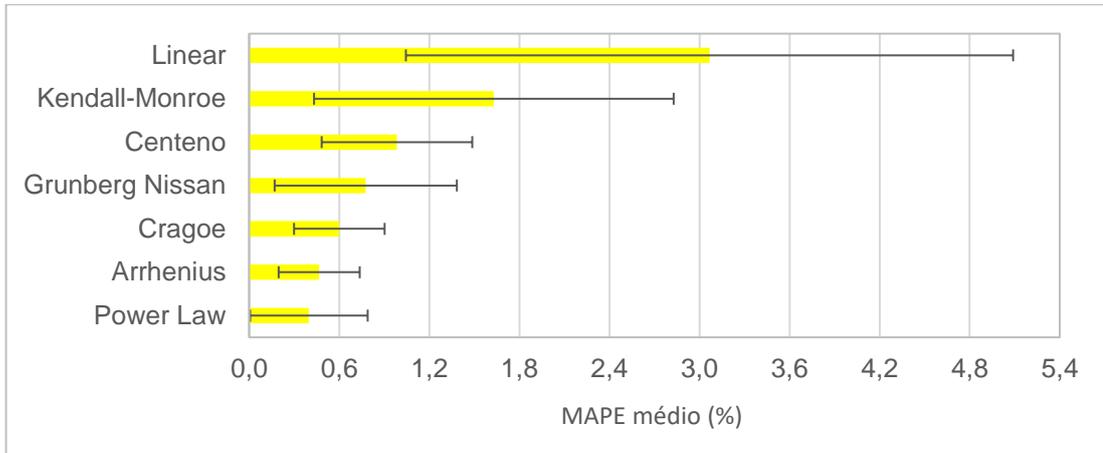
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.



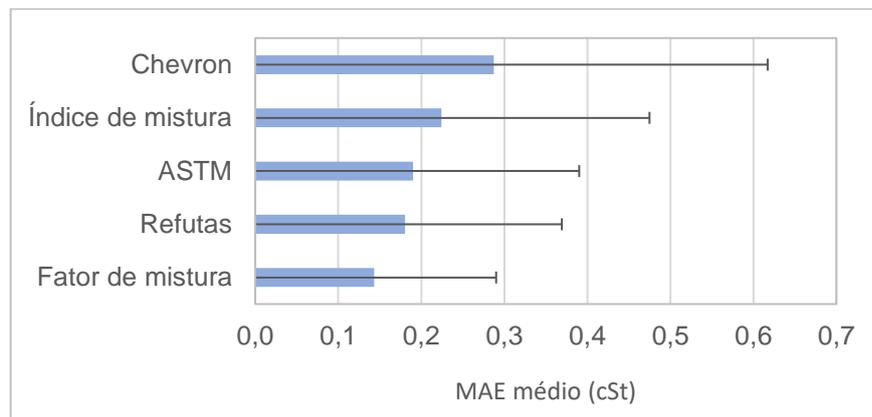
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade dinâmica na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.



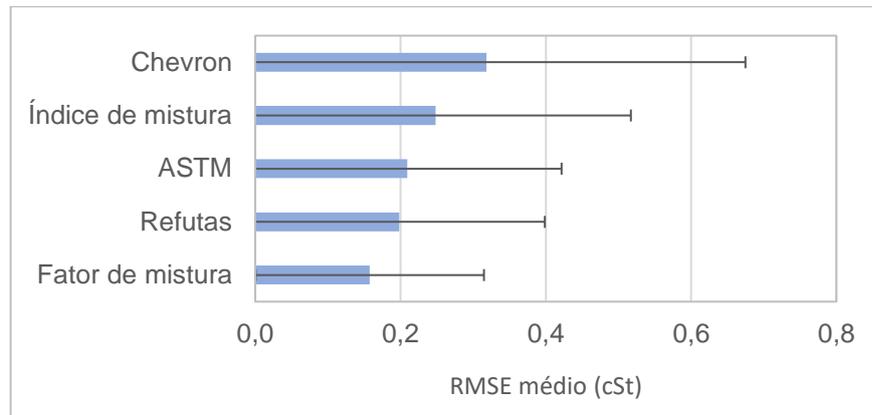
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12 – Valores médios de MAE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.



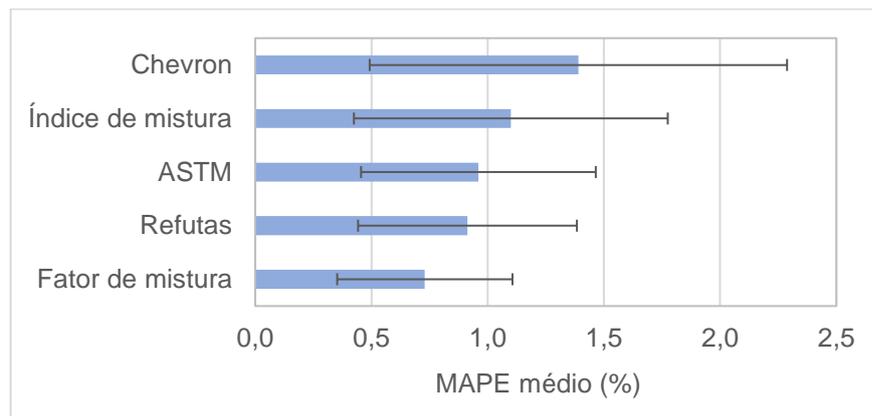
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 – Valores médios de RMSE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Valores médios de MAPE e desvio padrão dos modelos que preveem viscosidade cinemática na mistura entre óleo básico e óleo lubrificante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta etapa, os erros médios foram, no geral, menores do que os erros registrados nas misturas com aditivo VI. Isto se deve ao fato de que a variação de viscosidade entre as misturas óleo lubrificante-óleo básico foram menores em relação as misturas óleo lubrificante-VI. Tal fato já era esperado, visto que o óleo VI tem uma viscosidade dinâmica e cinemática muito superior aos óleos básicos. Portanto, o VI teve a maior capacidade de alterar as viscosidades dos lubrificantes. Tal comportamento pode ser visto na tabela 7.

Tabela 7 – Variação média de viscosidade dos lubrificantes entre as misturas com teor de 0,5% e 9,5%.

Componente adicionado	μ (cP)	ν (cSt)
Óleo básico	2,0676	2,3530
VI	7,1611	8,5941

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Tabela 7, pode-se dizer que, em média, a adição do aditivo VI em óleo lubrificante varia, pelo menos, 3 vezes mais a viscosidade do lubrificante do que a adição de óleo básico no intervalo entre 0,5% e 9,5% de componente adicionado.

Ademais, analisando os gráficos sobre a adição de óleo básico, pode-se dizer que não há diferença entre os modelos de predição de viscosidade, ou seja, para uma variação menor de viscosidade, como visto na Tabela 7, os modelos têm desempenhos parecidos. Não é possível destacar um melhor modelo, não só porque os erros médios, no geral, são semelhantes, mas também porque todos eles não foram consistentes, visto que os desvios padrões foram bem elevados em todos os casos, tanto que na maioria dos modelos, o desvio padrão foi tão grande que superou até mesmo o valor do erro médio em questão.

Tais resultados são semelhantes aos encontrados na literatura, como por exemplo em Centeno *et al* (2011), onde nenhum modelo analisado foi capaz de predizer a viscosidade.

Os dados experimentais de massa, densidade e viscosidades coletados durante este trabalho estão presentes nos Apêndices A e B.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas neste trabalho, ao adicionar o aditivo melhorador de VI e em óleos lubrificantes, os modelos correlativos de Grunberg-Nissan, Power law e o modelo de Arrhenius tiveram um desempenho superior aos outros modelos testados. Nesta mesma condição, os modelos de predição de viscosidade cinemática não apresentaram um bom desempenho, pois apresentaram erros e desvios grandes, fazendo com que não se pudesse dizer qual deles seria o melhor.

Em relação à adição de óleo básico em óleos lubrificantes, nenhum dos 13 modelos conseguiu prever a viscosidade com precisão, pois apesar de apresentarem erros menores em relação à condição de adição de aditivo modificador de viscosidade, seus desvios foram muito grandes, fazendo com todos os modelos tivessem um comportamento semelhante e não preciso.

Por fim, conclui-se que em situações em que se é necessário diminuir a viscosidade de um óleo lubrificante adicionando-se óleo básico, não há um melhor modelo para isso, pois os 13 modelos analisados neste trabalho tiveram um desempenho semelhante nessas condições. Mas em casos em que é necessário aumentar a viscosidade de um óleo lubrificante com um aditivo melhorador de VI, os modelos de Grunberg-Nissan, Power law e o modelo de Arrhenius são os que desempenham melhor.

O modelo de Grunberg-Nissan foi o único modelo que possuía um parâmetro termodinâmico (G), e foi um dos modelos que sempre figurou entre os que apresentaram os menores erros médios. Com isso, uma sugestão para trabalhos futuros seria o estudo exclusivo de modelos que possuem parâmetros termodinâmicos, pois talvez os modelos sem esses parâmetros são imprecisos, no geral, por causa das descondições de propriedades e interações das moléculas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Painel Dinâmico do Mercado Brasileiro de Lubrificantes**. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiYTc3ODcyNjUtYTY3Yi00YWQ5LTkwMmQtMDdlZTYwYjQxNzY3liwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzIxMyJ9&pageName=ReportSection443b4b9f7bd1048e10ed>. Acesso em 31 out. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 7152-11**: Standard practice for calculating viscosity of a blend of petroleum products. West Conshohocken: ASTM, 2011.

ARRHENIUS, S. Über die Dissociation der in Wasser gelösten Stoffe. **Zeitschrift für Physikalische Chemie**. v. 1, n. 1, p. 631-648, 9 nov. 1887. DOI:

<https://doi.org/10.1515/zpch-1887-0164>. Disponível em:

<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/zpch-1887-0164/html#Harvard>. Acesso em: 5 nov. 2023.

BINGHAM, E. C. The viscosity of binary mixtures. **The Journal of Physical Chemistry**. v. 18, n. 2, p. 157-165, 1913. DOI: <https://doi.org/10.1021/J150146A005>.

Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Viscosity-of-Binary-Mixtures-Bingham/73d153a074c7ee055686fc3777d18d565ab694f0>. Acesso em: 5 nov. 2023.

BLOOMFIELD, V. A.; DEWAN, R. K. Viscosity of liquid mixtures. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 75, n. 20, p. 3113-3119, 1 set. 1971. DOI:

<https://doi.org/10.1021/j100689a014>. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/j100689a014>. Acesso em: 5 nov. 2023.

BRASIL, Resolução nº 804, de 20 de dezembro de 2019. Dispõe sobre os critérios para obtenção do registro de graxas e óleos lubrificantes e as responsabilidades e obrigações dos detentores de registro, produtores e importadores. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 2019, n. 804, p 146, 23 dez. 2019.

CAINES, A. J.; HAYCOCK, R. F. **Automotive Lubricants Reference Book**. Revisão Roger F. Haycock; John E. Hillier. 2nd ed. Warrendale: SAE International, 2004. p. 705.

CENTENO, G.; SÁNCHEZ-REYNA, G.; ANCHEYTA, J.; MUÑOZ, J. A. D.; CARDONA, N. Testing various mixing rules for calculation of viscosity of petroleum blends. **Fuel**. v. 90, n. 12, p. 3561-3570, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.fuel.2011.02.028>. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-abe86b5d-5ff5-34ad-a375-f5930bd87487/tab/summary>. Acesso em: 5 nov. 2023.

CRAGOE, C. S. Changes in the viscosity of liquids with temperature, pressure and composition. OnePetro, Londres, 18 jul. 1933. Trabalho apresentado no 1º Congresso Mundial de Petróleo, 1933.

FARAH, M. A. **Caracterização de frações de petróleo pela viscosidade**. 2006. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

GAO, Y.; LI, K. New models for calculating the viscosity of mixed oil. **Fuel**. v. 95, p. 431-437, mai. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.043>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623611100812X>. Acesso em: 12 nov. 2023.

GRUNGERG, L.; NISSAN, A. H. Mixture law for viscosity. **Nature**. v. 164, n. 4175, p. 799-800, 5 nov. 1943. DOI: <https://doi.org/10.1038/164799b0>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15395375/>. Acesso em: 5 nov. 2023.

GAVIN, H. P. The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems. 17 p, 9 mar. 2016. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://people.duke.edu/~hpgavin/ExperimentalSystems/lm.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3448:1992**: Industrial liquid lubricants: ISO Viscosity classification. Genebra: ISO, 1992.

KENDALL, J.; MONROE, K. P. The viscosity of liquids. II. The viscosity-composition curve for ideal liquid mixtures. **Journal of the American Chemical Society**, v. 39, n. 9, p. 1787-1802, 1 set. 1917. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja02254a001>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja02254a001>. Acesso em: 05 nov. 2023

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. **Quarterly of Applied Mathematics**. v. 2, n. 2, p. 164-168, 1944. DOI: <https://doi.org/10.1090/qam/10666>. Disponível em:

<https://www.scirp.org/%28S%28czeh2tfqyw2orz553k1w0r45%29%29/reference/referencpapers.aspx?referenceid=1987558>. Acesso em: 5 nov. 2023.

MANG, T.; DRESEL, W. **Lubricants and Lubrication**. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VHC, 2007. 850 p.

MAPLES, R. E. **Petroleum Refinery Process Economics**. 2nd ed. Oklahoma: Pennwell Corporation, 2000. 448 p.

PIRRO, D. M.; WESSOL, A. A. **Lubrication Fundamentals**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2001. 540 p.

RIAZI, M. R. **Characterization and Properties of Petroleum Fractions**. Philadelphia: ASTM, 2005. 407 p.

RUDNICK, L. R. **Lubricant Additives: Chemistry and Applications**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 777 p.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. Tradução Mario Moro Fecchio; Nelson Manzanares Filho; José Carlos Cesar Amorim. 6. Ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011. 880 p.

APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS DURANTE A FASE DE ADIÇÃO DE ÓLEO BÁSICO.

Tabela 8 – Dados coletados do S-15W40 durante a fase de adição de OBS.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBS (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBS}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8750	0,1257	0,995	0,005	0,995	0,005	10,932	13,487
24,5000	0,5016	0,980	0,020	0,979	0,021	10,696	13,232
24,1286	0,877	0,965	0,035	0,964	0,036	10,522	13,013
23,7512	1,2514	0,950	0,050	0,949	0,051	10,351	12,800
23,3792	1,6274	0,935	0,065	0,934	0,066	10,182	12,595
23,0003	2,0031	0,920	0,080	0,918	0,082	9,9924	12,378
22,6274	2,3755	0,905	0,095	0,903	0,097	9,8297	12,213

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Dados coletados do S-5W30 durante a fase de adição de OBS.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBS (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBS}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8755	0,1282	0,995	0,005	0,995	0,005	7,3360	9,2212
24,5017	0,5029	0,980	0,020	0,980	0,020	7,2624	9,1236
24,1287	0,8757	0,965	0,035	0,965	0,035	7,1804	9,0274
23,7504	1,2514	0,950	0,050	0,950	0,050	7,1084	8,9331
23,3770	1,6274	0,935	0,065	0,934	0,066	7,0440	8,8565
23,0007	2,0006	0,920	0,080	0,919	0,081	6,9620	8,7580
22,6296	2,3765	0,905	0,095	0,904	0,096	6,8861	8,6682

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Dados coletados do S-15W50 durante a fase de adição de OBS.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBS (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBS}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	ν (cSt)
25,3244	0,1311	0,995	0,005	0,995	0,005	14,364	17,644
24,5063	0,5032	0,980	0,020	0,979	0,021	14,088	17,313
24,1264	0,8747	0,965	0,035	0,964	0,036	13,771	16,932
23,7509	1,2501	0,950	0,050	0,949	0,051	13,504	16,611
23,3898	1,6292	0,935	0,065	0,933	0,067	13,200	16,243
23,0074	2,0073	0,920	0,080	0,918	0,082	12,949	15,943
22,6262	2,3772	0,905	0,095	0,902	0,098	12,659	15,593

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Dados coletados do SD-15W40 durante a fase de adição de OBS.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBS (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBS}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8783	0,1275	0,995	0,005	0,995	0,005	11,746	14,244
24,5268	0,5003	0,980	0,020	0,979	0,021	11,548	14,012
24,1289	0,8795	0,965	0,035	0,963	0,037	11,341	13,770
23,7656	1,2579	0,950	0,050	0,948	0,052	11,123	13,516
23,3840	1,6252	0,935	0,065	0,932	0,068	10,946	13,308
23,0087	2,0019	0,920	0,080	0,917	0,083	10,738	13,064
22,6335	2,3749	0,905	0,095	0,901	0,099	10,543	12,835

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Dados coletados do SD-10W30 durante a fase de adição de OBS.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBS (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBS}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8743	0,1249	0,995	0,005	0,995	0,005	9,6858	11,888
24,5078	0,5006	0,980	0,020	0,979	0,021	9,5817	11,769
24,1275	0,8749	0,965	0,035	0,964	0,036	9,4245	11,582
23,7544	1,2501	0,950	0,050	0,948	0,052	9,2452	11,367
23,3766	1,6249	0,935	0,065	0,933	0,067	9,1345	11,235
23,0005	2,0040	0,920	0,080	0,918	0,082	8,9862	11,058
22,6277	2,3777	0,905	0,095	0,902	0,098	8,8757	10,927

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Dados coletados do M-SC durante a fase de adição de OBM.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBM (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBM}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBM}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8746	0,1280	0,995	0,005	0,995	0,005	12,945	15,582
24,5036	0,5030	0,980	0,020	0,980	0,020	12,733	15,333
24,1256	0,8774	0,965	0,035	0,964	0,036	12,488	15,042
23,7509	1,2521	0,950	0,050	0,949	0,051	12,280	14,793
23,3766	1,6279	0,935	0,065	0,934	0,066	12,054	14,527
23,0001	2,0040	0,920	0,080	0,919	0,081	11,848	14,281
22,6251	2,3760	0,905	0,095	0,904	0,096	11,633	14,024

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Dados coletados do M-85W140 durante a fase de adição de OBM.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBM (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBM}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	v (cSt)
24,8763	0,1270	0,995	0,005	0,995	0,005	21,072	24,773
24,5037	0,5063	0,980	0,020	0,979	0,021	20,397	23,990
24,1279	0,8788	0,965	0,035	0,964	0,036	19,793	23,297
23,7503	1,2539	0,950	0,050	0,948	0,052	19,266	22,687
23,3768	1,6262	0,935	0,065	0,932	0,068	18,774	22,121
23,0104	2,0068	0,920	0,080	0,917	0,083	18,339	21,620
22,6303	2,3788	0,905	0,095	0,901	0,099	17,787	20,986

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Dados coletados do S-SC durante a fase de adição de OBS.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBS (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBS}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	v (cSt)
24,8802	0,1261	0,995	0,005	0,995	0,005	6,4431	8,0558
24,5161	0,5014	0,980	0,020	0,979	0,021	6,3910	7,9907
24,1579	0,8786	0,965	0,035	0,964	0,036	6,3216	7,9061
23,7994	1,2596	0,950	0,050	0,948	0,052	6,2758	7,8506
23,3975	1,6318	0,935	0,065	0,932	0,068	6,2149	7,7757
23,0009	2,0060	0,920	0,080	0,917	0,083	6,1645	7,7138
22,6251	2,3828	0,905	0,095	0,901	0,099	6,1120	7,6507

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Dados coletados do M-460 durante a fase de adição de OBM.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBM (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBM}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBM}	μ (cP)	v (cSt)
24,8774	0,1267	0,995	0,005	0,995	0,005	26,213	30,671
24,5024	0,5032	0,980	0,020	0,979	0,021	25,344	29,677
24,1259	0,8792	0,965	0,035	0,963	0,037	24,589	28,813
23,7526	1,2572	0,950	0,050	0,948	0,052	23,839	27,954
23,3749	1,6253	0,935	0,065	0,932	0,068	23,099	27,102
23,0017	2,0039	0,920	0,080	0,916	0,084	22,373	26,269
22,6294	2,3755	0,905	0,095	0,901	0,099	21,697	25,492

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Dados coletados do M-680 durante a fase de adição de OBM.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBM (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBM}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBM}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8879	0,1265	0,995	0,005	0,995	0,005	34,430	40,257
24,5151	0,5084	0,980	0,020	0,979	0,021	33,198	38,848
24,5495	0,8903	0,965	0,035	0,963	0,037	32,132	37,625
23,7705	1,2500	0,950	0,050	0,948	0,052	30,773	36,062
23,3915	1,6344	0,935	0,065	0,932	0,068	29,855	34,960
22,9999	2,0053	0,920	0,080	0,916	0,084	28,836	33,767
22,6264	2,3744	0,905	0,095	0,901	0,099	27,352	32,029

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Dados coletados do S-100 durante a fase de adição de OBS.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBS (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBS}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBS}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8800	0,1299	0,995	0,005	0,995	0,005	9,4400	11,535
24,5068	0,5048	0,980	0,020	0,980	0,020	9,2814	11,347
24,6814	0,9025	0,965	0,035	0,965	0,035	9,1248	11,162
23,7497	1,2508	0,950	0,050	0,950	0,050	8,9779	10,988
23,3856	1,6249	0,935	0,065	0,935	0,065	8,8295	10,813
23,0260	2,0022	0,920	0,080	0,920	0,080	8,6911	10,650
22,6510	2,3898	0,905	0,095	0,904	0,096	8,5437	10,474

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Dados coletados do M-320 durante a fase de adição de OBM.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBM (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBM}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBM}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8747	0,1290	0,995	0,005	0,995	0,005	21,368	25,081
24,5008	0,5053	0,980	0,020	0,979	0,021	20,781	24,409
24,1258	0,8789	0,965	0,035	0,963	0,037	20,223	23,767
23,7549	1,2534	0,950	0,050	0,948	0,052	19,665	23,128
23,3801	1,6290	0,935	0,065	0,932	0,068	19,121	22,501
23,3146	2,0326	0,920	0,080	0,917	0,083	18,615	21,921
22,6316	2,3882	0,905	0,095	0,901	0,099	18,102	21,339

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Dados coletados do M-68 durante a fase de adição de OBM.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBM (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBM}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBM}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8752	0,1261	0,995	0,005	0,995	0,005	7,4012	9,0142
24,5119	0,5014	0,980	0,020	0,980	0,020	7,3358	8,9355
24,1274	0,8770	0,965	0,035	0,965	0,035	7,2746	8,8599
23,7534	1,2559	0,950	0,050	0,950	0,050	7,2128	8,7857
23,3799	1,6341	0,935	0,065	0,934	0,066	7,1515	8,7125
23,0003	2,0039	0,920	0,080	0,919	0,081	7,0923	8,6403
22,6278	2,3773	0,905	0,095	0,904	0,096	7,0343	8,5704

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 – Dados coletados do M-220 durante a fase de adição de OBM.

Massa de lubrificante (g)	Massa de OBM (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{OBM}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{OBM}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8818	0,1288	0,995	0,005	0,995	0,005	15,363	18,187
24,5121	0,5030	0,980	0,020	0,979	0,021	15,155	17,638
24,1353	0,8778	0,965	0,035	0,963	0,037	14,884	17,336
23,7505	1,2508	0,950	0,050	0,947	0,053	14,588	17,005
23,3842	1,6330	0,935	0,065	0,932	0,068	14,218	16,587
23,4452	2,0504	0,920	0,080	0,916	0,084	13,919	16,268
22,6442	2,3797	0,905	0,095	0,900	0,100	13,603	15,897

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B - DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS DURANTE A FASE DE ADIÇÃO DE VI.

Tabela 22 – Dados coletados do S-15W40 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$x_{\text{lubrificante}}$	x_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8762	0,1268	0,995	0,005	0,995	0,005	11,248	13,867
24,5036	0,5016	0,980	0,020	0,980	0,020	12,122	14,943
24,1281	0,8813	0,965	0,035	0,965	0,035	13,058	16,097
23,7601	1,2566	0,950	0,050	0,950	0,050	14,068	17,338
23,3805	1,6255	0,935	0,065	0,936	0,064	15,126	18,640
23,0030	2,0092	0,920	0,080	0,920	0,080	16,201	19,950
22,6288	2,383	0,905	0,095	0,906	0,094	17,439	21,489

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 – Dados coletados do S-5W30 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$x_{\text{lubrificante}}$	x_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8812	0,1301	0,995	0,005	0,995	0,005	7,5793	9,5250
24,5020	0,5039	0,980	0,020	0,980	0,020	8,1936	10,302
24,1291	0,8796	0,965	0,035	0,966	0,034	8,9027	11,179
23,7599	1,2545	0,950	0,050	0,951	0,049	9,6248	12,083
23,3780	1,6300	0,935	0,065	0,936	0,064	10,426	13,079
22,9997	2,0000	0,920	0,080	0,922	0,078	11,256	14,113
22,6292	2,3782	0,905	0,095	0,907	0,093	12,185	15,271

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Dados coletados do S-15W50 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$x_{\text{lubrificante}}$	x_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8778	0,1279	0,995	0,005	0,995	0,005	14,812	18,192
24,5003	0,505	0,980	0,020	0,980	0,020	15,884	19,507
24,1319	0,8811	0,965	0,035	0,965	0,035	16,952	20,817
23,7526	1,2509	0,950	0,050	0,950	0,050	18,119	22,248
23,3769	1,6262	0,935	0,065	0,935	0,065	19,195	23,568
23,0006	2,0060	0,920	0,080	0,920	0,080	20,837	25,584
22,6299	2,3813	0,905	0,095	0,905	0,095	22,283	27,358

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 25 – Dados coletados do SD-15W40 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8883	0,1248	0,995	0,005	0,995	0,005	12,130	14,705
24,5509	0,503	0,980	0,020	0,980	0,020	13,059	15,836
24,1288	0,8828	0,965	0,035	0,964	0,036	14,065	17,057
23,7508	1,2555	0,950	0,050	0,949	0,051	15,068	18,277
23,3762	1,6293	0,935	0,065	0,934	0,066	16,250	19,712
23,0035	2,0088	0,920	0,080	0,919	0,081	17,490	21,218
22,6252	2,3798	0,905	0,095	0,904	0,096	18,787	22,795

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26 – Dados coletados do SD-10W30 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8876	0,1290	0,995	0,005	0,995	0,005	9,9221	12,176
24,5015	0,5047	0,980	0,020	0,980	0,020	10,744	13,182
24,1271	0,8828	0,965	0,035	0,965	0,035	11,354	13,931
23,7541	1,2498	0,950	0,050	0,950	0,050	12,445	15,269
23,3763	1,6305	0,935	0,065	0,935	0,065	13,283	16,310
23,0073	2,0080	0,920	0,080	0,920	0,080	14,412	17,681
22,6277	2,3759	0,905	0,095	0,905	0,095	15,221	18,672

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27 – Dados coletados do M-SC durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8774	0,1288	0,995	0,005	0,995	0,005	13,341	16,059
24,5021	0,5030	0,980	0,020	0,980	0,020	14,382	17,317
24,1292	0,8787	0,965	0,035	0,964	0,036	15,385	18,529
23,7564	1,2531	0,950	0,050	0,949	0,051	16,254	19,581
23,3779	1,6287	0,935	0,065	0,934	0,066	17,458	21,037
22,9967	2,0023	0,920	0,080	0,919	0,081	18,700	22,540
22,6301	2,3788	0,905	0,095	0,903	0,097	20,005	24,120

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28 – Dados coletados do M-85W140 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
25,0912	0,1331	0,995	0,005	0,995	0,005	21,533	25,325
24,5004	0,5082	0,980	0,020	0,979	0,021	22,866	26,904
24,1322	0,8769	0,965	0,035	0,964	0,036	23,885	28,110
23,7577	1,2560	0,950	0,050	0,948	0,052	25,390	29,911
23,3823	1,6346	0,935	0,065	0,932	0,068	26,850	31,639
22,9983	2,0015	0,920	0,080	0,917	0,083	28,862	34,034
22,6338	2,3825	0,905	0,095	0,901	0,099	30,876	36,433

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 – Dados coletados do S-SC durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8769	0,1302	0,995	0,005	0,995	0,005	6,6470	8,3014
24,5088	0,5044	0,980	0,020	0,980	0,020	7,1732	8,9620
24,1265	0,8825	0,965	0,035	0,966	0,034	7,7750	9,7119
23,7529	1,2500	0,950	0,050	0,951	0,049	8,4412	10,540
23,3757	1,6281	0,935	0,065	0,936	0,064	9,1337	11,450
23,0088	2,0065	0,920	0,080	0,921	0,079	10,280	12,824
22,6250	2,3824	0,905	0,095	0,907	0,093	11,359	14,170

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 30 – Dados coletados do M-460 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8806	0,1261	0,995	0,005	0,995	0,005	26,903	31,477
24,5041	0,5008	0,980	0,020	0,979	0,021	28,490	33,359
24,1265	0,8776	0,965	0,035	0,963	0,037	29,867	34,995
23,7542	1,2535	0,950	0,050	0,948	0,052	31,678	37,144
23,3768	1,6308	0,935	0,065	0,932	0,068	33,290	39,061
23,0094	2,0013	0,920	0,080	0,916	0,084	35,357	41,518
22,6297	2,3782	0,905	0,095	0,901	0,099	37,315	43,843

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 – Dados coletados do M-680 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	v (cSt)
24,8742	0,1243	0,995	0,005	0,995	0,005	35,460	41,464
24,5000	0,4962	0,980	0,020	0,979	0,021	37,098	43,411
24,1285	0,8763	0,965	0,035	0,963	0,037	38,722	45,342
23,7622	1,2541	0,950	0,050	0,948	0,052	40,607	47,550
23,3781	1,6258	0,935	0,065	0,932	0,068	42,359	49,750
23,0025	2,0012	0,920	0,080	0,916	0,084	44,214	51,773
22,6248	2,3781	0,905	0,095	0,901	0,099	46,600	54,567

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32 – Dados coletados do S-100 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	v (cSt)
24,8831	0,1296	0,995	0,005	0,995	0,005	9,7647	11,931
24,5009	0,5004	0,980	0,020	0,980	0,020	10,588	12,936
24,1251	0,8801	0,965	0,035	0,965	0,035	11,465	14,009
23,7527	1,2569	0,950	0,050	0,950	0,050	12,301	15,125
23,3804	1,6268	0,935	0,065	0,935	0,065	13,417	16,393
23,0062	2,0024	0,920	0,080	0,920	0,080	14,277	17,447
22,6264	2,3769	0,905	0,095	0,905	0,095	15,424	18,847

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 – Dados coletados do M-320 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	v (cSt)
24,8799	0,1297	0,995	0,005	0,005	0,005	21,976	25,796
24,5017	0,5065	0,980	0,020	0,021	0,020	23,381	27,463
24,1374	0,8763	0,965	0,035	0,037	0,035	24,774	29,117
23,7503	1,2549	0,950	0,050	0,052	0,050	26,107	30,704
23,3791	1,6328	0,935	0,065	0,068	0,065	27,809	32,727
22,9995	2,0048	0,920	0,080	0,084	0,080	29,246	34,417
22,6313	2,3791	0,905	0,095	0,099	0,095	30,964	36,489

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 34 – Dados coletados do M-68 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8833	0,1312	0,995	0,005	0,005	0,005	7,6907	9,3657
24,5086	0,5069	0,980	0,020	0,021	0,020	8,3613	10,181
24,1312	0,8813	0,965	0,035	0,037	0,035	9,1221	11,108
23,7536	1,2563	0,950	0,050	0,052	0,051	9,9460	12,110
23,3747	1,6244	0,935	0,065	0,068	0,066	10,818	13,173
23,0094	2,0005	0,920	0,080	0,084	0,081	11,775	14,340
22,6201	2,3817	0,905	0,095	0,099	0,096	12,801	15,590

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 – Dados coletados do M-220 durante a fase de adição de VI.

Massa de lubrificante (g)	Massa de VI (g)	$X_{\text{lubrificante}}$	X_{VI}	$\Phi_{\text{lubrificante}}$	Φ_{VI}	μ (cP)	ν (cSt)
24,8774	0,1285	0,995	0,005	0,005	0,005	16,052	18,669
24,5000	0,5046	0,980	0,020	0,021	0,021	16,845	19,604
24,1258	0,8756	0,965	0,035	0,037	0,037	18,142	21,132
23,7492	1,2494	0,950	0,050	0,052	0,053	19,414	22,632
23,3807	1,6254	0,935	0,065	0,068	0,068	20,476	23,892
23,0091	2,0086	0,920	0,080	0,084	0,084	22,168	25,888
22,6457	2,3814	0,905	0,095	0,099	0,100	23,551	27,527

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ERROS MAE, RMSE E MAPE DOS MODELOS NA PREDIÇÃO DA VISCOSIDADE COM MISTURAS ENTRE ÓLEO LUBRIFICANTE E VI.

Tabela 36 – Resultados do MAE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e VI.

Modelo	S-5W30	S-15W40	S-15W50	SD-10W30	SD-15W40	S-100	S-SC	M-220	M-85W140	M-SC	M-068	M-320	M-460	M-680
Kendall-Monroe	2,4281	2,6339	2,9704	2,8181	2,6216	2,4520	2,3116	2,7497	3,1710	2,8051	2,1839	3,1543	3,2289	3,6630
Arrhenius	0,50091	0,61486	0,52529	0,33170	0,62957	0,65124	0,49816	0,59143	0,40143	0,51186	0,70043	0,40557	0,45314	0,14120
Fator de mistura	1,4193	1,7649	1,7353	1,3340	1,8143	1,7444	1,3923	1,3561	1,8297	1,7030	1,6814	1,8424	1,9920	1,6932
Refutas	1,5636	1,9539	1,9484	1,5294	2,0583	1,9394	1,5363	1,7278	2,2211	1,9632	1,8660	2,2594	2,4288	2,1748
Linear	29,581	29,062	28,577	29,802	29,446	29,533	29,886	29,702	28,536	29,396	30,057	28,599	27,594	26,549
ASTM D7152-11	1,5777	1,9673	1,9604	1,5429	2,0714	1,9529	1,5507	1,7402	2,2329	1,9762	1,8802	2,2709	2,4397	2,1847
Índice de mistura	1,5953	1,9671	1,9484	1,5294	2,0250	1,9394	1,5604	1,5844	2,0706	1,9193	1,8610	2,0851	2,2375	1,9394
Cragoe	1,1085	1,3889	1,4011	1,0646	1,4936	1,3908	1,0747	1,6941	1,6224	1,4236	1,3636	1,6636	1,7987	1,6002
Chevron	1,7383	2,1573	2,1777	1,7051	2,2274	2,1106	1,6900	1,8331	2,3670	2,1346	2,0052	2,3873	2,5754	2,3288
Centeno	1,2698	1,5836	1,6157	1,2483	1,6943	1,5734	1,2253	1,9144	1,8623	1,6311	1,5261	1,9044	2,0493	1,8590
Bingham	2,0108	2,6197	2,9186	2,1849	2,7840	2,4852	1,8864	3,2327	3,5413	2,8047	2,2631	3,6043	4,0170	4,2125
Power Law	0,018771	0,080143	0,12671	0,18199	0,13986	0,16381	0,14999	0,29157	0,19700	0,063000	0,26914	0,091143	0,071857	0,43397
Grunberg-Nissan	0,21260	0,29100	0,39743	0,22899	0,33800	0,31204	0,30261	0,46700	0,54571	0,22586	0,41646	0,37929	0,55100	1,1777

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 37 – Resultados do RMSE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e VI.

Modelo	S-5W30	S-15W40	S-15W50	SD-10W30	SD-15W40	S-100	S-SC	M-220	M-85W140	M-SC	M-068	M-320	M-460	M-680
Kendall-Monroe	2,9399	3,1606	3,4897	3,3565	3,1318	2,9781	2,7341	3,3185	3,7228	3,3873	2,6486	3,7831	3,8232	4,4143
Arrhenius	0,59563	0,74125	0,67792	0,41961	0,76857	0,75593	0,68760	0,67325	0,58006	0,58709	0,82610	0,45929	0,56194	0,16826
Fator de mistura	1,6991	2,1110	2,1552	1,6389	2,1847	2,0510	1,7648	1,7481	2,2554	2,0040	2,0005	2,1590	2,3847	1,9162
Refutas	1,8684	2,3323	2,4136	1,8727	2,4722	2,2828	1,9336	2,1974	2,7218	2,3150	2,2231	2,6541	2,8992	2,4822
Linear	34,409	33,784	33,195	34,665	34,232	34,396	34,724	34,634	33,174	34,254	35,039	33,288	32,058	30,922
ASTM D7152-11	1,8851	2,3480	2,4280	1,8885	2,4877	2,2988	1,9505	2,2118	2,7355	2,3302	2,2400	2,6676	2,9120	2,4937
Índice de mistura	1,9085	2,3512	2,4136	1,8727	2,4347	2,2828	1,9634	2,0215	2,5386	2,2608	2,2145	2,4463	2,6746	2,2055
Cragoe	1,3204	1,6614	1,7390	1,3079	1,7968	1,6389	1,3654	1,9848	2,0032	1,6743	1,6243	1,9514	2,1488	1,8268
Chevron	2,0788	2,5775	2,6885	2,0819	2,6761	2,4869	2,1174	2,3171	2,8902	2,5178	2,3872	2,8058	3,0758	2,6661
Centeno	1,5130	1,8932	1,9951	1,5278	2,0354	1,8563	1,5437	2,2460	2,2856	1,9211	1,8183	2,2367	2,4452	2,1317
Bingham	2,3950	3,1255	3,5399	2,6399	3,3308	2,9404	2,3268	3,8088	4,2698	3,3143	2,6945	4,2526	4,7774	4,9158
Power Law	0,02157	0,09533	0,14115	0,21440	0,18011	0,18181	0,20913	0,31493	0,23983	0,07663	0,31144	0,11252	0,09237	0,52836
Grunberg-Nissan	0,25614	0,33653	0,42407	0,27598	0,41023	0,37860	0,43060	0,55343	0,59360	0,26284	0,52808	0,45588	0,63718	1,1824

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 38 – Resultados do MAPE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e VI.

Modelo	S-5W30	S-15W40	S-15W50	SD-10W30	SD-15W40	S-100	S-SC	M-220	M-85W140	M-SC	M-068	M-320	M-460	M-680
Kendall-Monroe	22,843	17,160	15,169	20,931	15,889	18,060	24,441	13,082	11,588	15,757	19,748	11,234	9,5574	8,5217
Arrhenius	4,7448	3,9994	2,6234	2,4321	3,7922	4,8728	5,0048	2,8804	1,4188	2,9284	6,4063	1,4694	1,3333	0,35934
Fator de mistura	10,686	9,3395	7,0989	7,9824	9,0434	10,617	11,489	5,4247	5,6091	8,0044	12,5831	5,6088	5,0136	3,4096
Refutas	11,780	10,346	7,9750	9,1613	10,267	11,799	12,708	6,9368	6,8154	9,2202	13,9576	6,8733	6,1162	4,3703
Linear	282,26	191,29	146,42	222,88	180,07	220,55	318,40	142,75	104,55	166,90	275,97	102,61	82,066	62,200
ASTM D7152-11	11,887	10,418	8,0244	9,2426	10,333	11,881	12,830	6,9880	6,8517	9,2814	14,065	6,9080	6,1436	4,3900
Índice de mistura	12,014	10,412	7,9750	9,1610	10,098	11,799	12,909	6,3550	6,3538	9,0173	13,926	6,3455	5,6332	3,9006
Cragoe	10,491	9,055	7,0387	7,8167	9,0328	10,347	11,072	8,1380	5,8586	8,0642	12,422	5,9574	5,3147	3,7676
Chevron	13,093	11,420	8,9215	10,223	11,110	12,836	14,001	7,3720	7,2688	10,024	15,003	7,2615	6,4847	4,6764
Centeno	12,015	10,327	8,1275	9,1765	10,251	11,700	12,658	9,1908	6,7325	9,2353	13,901	6,8176	6,0563	4,3723
Bingham	19,028	17,096	14,757	16,130	16,866	18,461	19,629	15,494	12,850	15,860	20,617	12,888	11,879	9,8673
Power Law	0,20666	0,52554	0,70348	1,4231	0,83049	1,2691	1,5144	1,5218	0,74997	0,40728	2,4840	0,32679	0,22588	1,0147
Grunberg-Nissan	2,1005	2,0393	2,2793	2,0298	2,1610	2,3733	3,1780	2,6166	2,2192	1,4159	3,7539	1,5680	1,8567	2,9081

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ERROS MAE, RMSE E MAPE DOS MODELOS NA PREDIÇÃO DA VISCOSIDADE COM MISTURAS ENTRE ÓLEO LUBRIFICANTE E ÓLEO BÁSICO.

Tabela 39 – Resultados do MAE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e óleo básico.

Modelo	S-5W30	S-15W40	S-15W50	SD-10W30	SD-15W40	S-100	S-SC	M-220	M-85W140	M-SC	M-068	M-320	M-460	M-680
Kendall-Monroe	0,00761	0,11727	0,30014	0,08906	0,12757	0,10066	0,06187	0,12729	0,48729	0,12386	0,01413	0,53386	0,77229	1,2046
Arrhenius	0,03161	0,01399	0,08814	0,01746	0,02171	0,03937	0,04759	0,10000	0,11457	0,01686	0,00536	0,12057	0,16729	0,24457
Fator de mistura	0,04486	0,10971	0,12157	0,06857	0,12557	0,00957	0,03694	0,10914	0,23171	0,08357	0,02264	0,17414	0,30057	0,56871
Refutas	0,05529	0,13514	0,15900	0,07943	0,13700	0,03586	0,04051	0,09929	0,29114	0,11800	0,02779	0,23057	0,38729	0,72986
Linear	0,04424	0,24499	0,53714	0,18177	0,27171	0,19323	0,07216	0,31543	0,87229	0,27457	0,04041	0,94714	1,3677	2,14143
ASTM D7152-11	0,05786	0,14214	0,16971	0,08429	0,14500	0,04071	0,03980	0,08914	0,30843	0,12486	0,02907	0,24871	0,41286	0,76871
Índice de mistura	0,05829	0,15371	0,18900	0,09914	0,17586	0,03743	0,03251	0,07614	0,37414	0,13114	0,02993	0,32300	0,52286	0,93457
Cragoe	0,04933	0,04701	0,08229	0,03986	0,07386	0,00777	0,04744	0,17386	0,12743	0,06186	0,01521	0,07114	0,14357	0,33700
Chevron	0,06714	0,18343	0,24429	0,11986	0,20971	0,05629	0,02980	0,10171	0,47586	0,16343	0,03479	0,43000	0,68800	1,21971
Centeno	0,05733	0,07444	0,12914	0,06086	0,11029	0,02749	0,04501	0,22957	0,24371	0,09714	0,02007	0,19286	0,32957	0,65029
Bingham	0,14133	0,41616	0,85114	0,29871	0,55157	0,23120	0,01644	0,91257	1,7069	0,48200	0,06764	1,7453	2,8063	5,04700
Power Law	0,03933	0,02001	0,05643	0,02251	0,03500	0,01849	0,01039	0,24457	0,07157	0,02486	0,00964	0,05257	0,05843	0,16371
Grunberg-Nissan	0,06961	0,03444	0,03800	0,03151	0,04829	0,02740	0,03984	0,22829	0,46229	0,05400	0,04479	0,12100	0,17929	0,31457

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 40 – Resultados do RMSE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e óleo básico.

Modelo	S-5W30	S-15W40	S-15W50	SD-10W30	SD-15W40	S-100	S-SC	M-220	M-85W140	M-SC	M-068	M-320	M-460	M-680
Kendall-Monroe	0,00910	0,13189	0,31358	0,09622	0,14036	0,11845	0,07117	0,17798	0,55357	0,14899	0,01632	0,61694	0,90020	1,4502
Arrhenius	0,03348	0,01601	0,09340	0,02325	0,02645	0,04549	0,05478	0,11425	0,12449	0,02071	0,00575	0,14503	0,19434	0,34425
Fator de mistura	0,05461	0,12454	0,14270	0,07796	0,14464	0,01048	0,04248	0,12362	0,24275	0,08979	0,02465	0,19138	0,32390	0,61408
Refutas	0,06572	0,15422	0,18814	0,09081	0,15945	0,03751	0,04652	0,11569	0,30499	0,12896	0,03014	0,25526	0,42038	0,77816
Linear	0,05296	0,27895	0,58299	0,20181	0,30651	0,22623	0,08313	0,40313	1,0099	0,32410	0,04724	1,0942	1,5866	2,5331
ASTM D7152-11	0,06861	0,16206	0,20101	0,09634	0,16891	0,04295	0,04578	0,10932	0,32381	0,13675	0,03169	0,27576	0,44925	0,81999
Índice de mistura	0,06997	0,17432	0,22744	0,11219	0,20356	0,03968	0,03736	0,09547	0,39740	0,14358	0,03301	0,35983	0,57427	1,0053
Cragoe	0,05301	0,05581	0,09371	0,04733	0,08571	0,00901	0,05473	0,18428	0,13595	0,06519	0,01655	0,07548	0,14976	0,36965
Chevron	0,08014	0,20808	0,29170	0,13583	0,24338	0,06104	0,03420	0,11417	0,51018	0,18027	0,03863	0,48050	0,75988	1,3182
Centeno	0,06198	0,08980	0,15335	0,07011	0,12827	0,02850	0,05185	0,24351	0,25546	0,10483	0,02199	0,21264	0,35751	0,69583
Bingham	0,15795	0,47262	0,98331	0,34441	0,62858	0,25904	0,01926	1,0044	1,8747	0,53831	0,07674	1,9367	3,0900	5,4862
Power Law	0,04171	0,02206	0,06935	0,02685	0,04103	0,02162	0,01289	0,25152	0,08013	0,02570	0,01012	0,06404	0,07037	0,19686
Grunberg-Nissan	0,07004	0,03820	0,04085	0,03610	0,04887	0,03363	0,04016	0,23435	0,52875	0,06030	0,04481	0,14308	0,21411	0,39514

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 41 – Resultados do MAPE dos modelos na predição da viscosidade com misturas entre óleo lubrificante e óleo básico.

Modelo	S-5W30	S-15W40	S-15W50	SD-10W30	SD-15W40	S-100	S-SC	M-220	M-85W140	M-SC	M-068	M-320	M-460	M-680
Kendall-Monroe	0,10697	1,1533	2,2546	0,97165	1,1655	1,1446	0,99623	0,91166	2,6008	1,0337	0,19778	2,8054	3,3683	4,1116
Arrhenius	0,44763	0,13386	0,64495	0,18726	0,19773	0,44698	0,76621	0,68471	0,59834	0,13948	0,07458	0,63656	0,72910	0,84261
Fator de mistura	0,50889	0,87186	0,74268	0,60930	0,94706	0,08652	0,47535	0,63502	1,0313	0,57291	0,25955	0,77195	1,1035	1,5969
Refutas	0,62664	1,0745	0,97749	0,70683	1,0342	0,32949	0,52127	0,57603	1,2992	0,81054	0,31848	1,0236	1,4240	2,0609
Linear	0,63087	2,4128	4,0551	1,9895	2,4880	2,1964	1,1619	2,2462	4,6678	2,2883	0,56606	4,9772	5,9618	7,2897
ASTM D7152-11	0,65572	1,1301	1,0445	0,75028	1,0947	0,37454	0,51211	0,51485	1,3776	0,85784	0,33329	1,1044	1,5186	2,1729
Índice de mistura	0,66089	1,2217	1,1659	0,88247	1,3269	0,34449	0,41833	0,44179	1,6764	0,90094	0,34328	1,4349	1,9261	2,6511
Cragoe	0,69951	0,46406	0,61569	0,43540	0,67765	0,08518	0,76396	1,2049	0,66070	0,50984	0,21245	0,36905	0,61395	1,0980
Chevron	0,76115	1,4580	1,5091	1,0674	1,5827	0,51926	0,38337	0,60260	2,1369	1,1236	0,39912	1,9111	2,5367	3,4719
Centeno	0,81330	0,73579	0,97893	0,66626	1,0123	0,30891	0,72480	1,5975	1,2812	0,80308	0,28038	1,0070	1,4216	2,1553
Bingham	2,0089	4,0977	6,4659	3,2782	5,0539	2,6192	0,26482	6,4035	9,0692	3,9981	0,94635	9,1188	12,130	16,889
Power Law	0,55715	0,19516	0,40749	0,24379	0,32061	0,20967	0,16747	1,6800	0,38066	0,20224	0,13437	0,27779	0,25263	0,54334
Grunberg-Nissan	0,98130	0,32995	0,27879	0,34120	0,43478	0,30057	0,63600	1,5795	2,4669	0,43260	0,62072	0,63304	0,77696	1,0627

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE E – RESULTADOS DE VISCOSIDADES EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS DOS MODELOS DE ARRHENIUS, POWER LAW E GRUNBERG-NISSAN.

Tabela 42 – Resultados experimentais e teóricos na etapa de adição de óleo básico

(continua)

Óleo	Fonte do dado de viscosidade	% de óleo básico adicionado						
		0,5%	2,0%	3,5%	5,0%	6,5%	8,0%	9,5%
M-220	μ experimental (cP)	15,363	15,155	14,884	14,588	14,218	13,919	13,603
	Arrhenius (cP)	15,338	15,023	14,715	14,413	14,135	13,845	13,561
	Power Law (cP)	15,736	15,404	15,079	14,763	14,453	14,151	13,856
	Grunberg-Nissan (cP)	15,654	15,347	15,045	14,749	14,46	14,176	13,897
M-85W140	μ experimental (cP)	21,072	20,397	19,793	19,266	18,774	18,339	17,787
	Arrhenius (cP)	20,902	20,372	19,886	19,381	18,889	18,439	17,971
	Power Law (cP)	20,902	20,372	19,886	19,381	18,889	18,439	17,971
	Grunberg-Nissan (cP)	20,940	20,551	20,166	19,787	19,412	19,042	18,677
M-680	μ experimental (cP)	34,430	33,198	32,132	30,773	29,855	28,836	27,352
	Arrhenius (cP)	34,310	33,173	32,074	31,077	30,047	29,052	28,149
	Power Law (cP)	34,265	33,071	31,923	30,820	29,759	28,738	27,756
	Grunberg-Nissan (cP)	34,115	33,054	32,027	31,031	30,066	29,131	28,226
M-460	μ experimental (cP)	26,213	25,344	24,589	23,839	23,099	22,373	21,697
	Arrhenius (cP)	26,166	25,410	24,675	24,006	23,312	22,638	22,024
	Power Law (cP)	26,140	25,357	24,600	23,869	23,161	22,476	21,814
	Grunberg-Nissan (cP)	26,017	25,312	24,625	23,957	23,307	22,675	22,060
M-SC	μ experimental (cP)	12,945	12,733	12,488	12,280	12,054	11,848	11,633
	Arrhenius (cP)	12,930	12,714	12,487	12,278	12,073	11,871	11,672
	Power Law (cP)	12,925	12,696	12,470	12,249	12,033	11,821	11,613
	Grunberg-Nissan (cP)	12,857	12,641	12,430	12,222	12,018	11,816	11,619

Tabela 42 – Resultados experimentais e teóricos na etapa de adição de óleo básico

(continua)

Óleo	Fonte do dado de viscosidade	% de óleo básico adicionado						
		0,5%	2,0%	3,5%	5,0%	6,5%	8,0%	9,5%
M-68	μ experimental (cP)	7,4012	7,3358	7,2746	7,2128	7,1515	7,0923	7,0343
	Arrhenius (cP)	7,3951	7,3334	7,2710	7,2111	7,1453	7,0855	7,0262
	Power Law (cP)	7,3941	7,3309	7,2670	7,2044	7,1411	7,0800	7,0196
	Grunberg-Nissan (cP)	7,3532	7,2911	7,2313	7,1690	7,1087	7,0499	6,9891
M-320	μ experimental (cP)	21,368	20,781	20,223	19,665	19,121	18,615	18,102
	Arrhenius (cP)	21,372	20,822	20,286	19,796	19,286	18,821	18,336
	Power Law (cP)	21,356	20,792	20,245	19,715	19,199	18,699	18,213
	Grunberg-Nissan (cP)	21,251	20,737	20,237	19,748	19,271	18,805	18,351
S-SC	μ experimental (cP)	6,4431	6,3910	6,3216	6,2758	6,2149	6,1645	6,1120
	Arrhenius (cP)	6,4501	6,4064	6,3632	6,3222	6,2796	6,2394	6,1978
	Power Law (cP)	6,4432	6,3830	6,3229	6,2627	6,2050	6,1471	6,0888
	Grunberg-Nissan (cP)	6,4072	6,3488	6,2910	6,2344	6,1772	6,1204	6,0650
S-100	μ experimental (cP)	9,4400	9,2814	9,1248	8,9779	8,8295	8,6911	8,5437
	Arrhenius (cP)	9,4294	9,2900	9,1530	9,0182	8,8847	8,7532	8,6153
	Power Law (cP)	9,4270	9,2800	9,1355	8,9935	8,8541	8,7170	8,5822
	Grunberg-Nissan (cP)	9,3763	9,2373	9,1010	8,9666	8,8334	8,7032	8,5754
SD-10W30	μ experimental (cP)	9,6858	9,5817	9,4245	9,2452	9,1345	8,9862	8,8757
	Arrhenius (cP)	9,7312	9,5734	9,4273	9,2743	9,1338	8,9934	8,8472
	Power Law (cP)	9,7272	9,5722	9,4178	9,2665	9,1180	8,9721	8,8293
	Grunberg-Nissan (cP)	9,6764	9,5285	9,3831	9,2402	9,1000	8,9616	8,8240

Tabela 42 – Resultados experimentais e teóricos na etapa de adição de óleo básico

(conclusão)

Óleo	Fonte do dado de viscosidade	% de óleo básico adicionado						
		0,5%	2,0%	3,5%	5,0%	6,5%	8,0%	9,5%
S-15W40	μ experimental (cP)	10,932	10,696	10,522	10,351	10,182	9,9924	9,8297
	Arrhenius (cP)	10,923	10,725	10,543	10,365	10,189	10,005	9,8351
	Power Law (cP)	10,918	10,722	10,529	10,340	10,154	9,9732	9,7953
	Grunberg-Nissan (cP)	10,860	10,676	10,495	10,317	10,143	9,9710	9,8018
S-15W50	μ experimental (cP)	14,364	14,088	13,771	13,504	13,200	12,949	12,659
	Arrhenius (cP)	14,509	14,182	13,882	13,588	13,282	13,001	12,708
	Power Law (cP)	14,501	14,169	13,847	13,532	13,225	12,926	12,634
	Grunberg-Nissan (cP)	14,427	14,122	13,823	13,531	13,244	12,964	12,690
S-5W30	μ experimental (cP)	7,3360	7,2624	7,1804	7,1084	7,0440	6,9620	6,8861
	Arrhenius (cP)	7,3194	7,2388	7,1590	7,0802	6,9972	6,9206	6,8440
	Power Law (cP)	7,3181	7,2339	7,1524	7,0704	6,9887	6,9100	6,8312
	Grunberg-Nissan (cP)	7,2782	7,1967	7,1181	7,0400	6,9624	6,8863	6,8102

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 43 – Dados experimentais e teóricos para os modelos Power law, Arrhenius e Grunberg-Nissan nas misturas entre óleo lubrificante e VI.

(continua)

Óleo	Fonte do dado de viscosidade	% de VI adicionado						
		0,5%	2,0%	3,5%	5,0%	6,5%	8,0%	9,5%
M-220	μ experimental (cP)	16,052	16,845	18,142	19,414	20,476	22,168	23,551
	Arrhenius (cP)	15,731	16,705	17,739	18,767	19,929	21,163	22,474
	Power Law (cP)	16,196	17,284	18,439	19,664	20,963	22,341	23,802
	Grunberg-Nissan (cP)	16,774	17,739	18,759	19,839	20,980	22,187	23,463
M-85W140	μ experimental (cP)	21,533	22,866	23,885	25,390	26,850	28,862	30,876
	Arrhenius (cP)	21,437	22,651	23,852	25,204	26,632	28,044	29,632
	Power Law (cP)	21,493	22,807	24,195	25,659	27,205	28,836	30,556
	Grunberg-Nissan (cP)	22,270	23,451	24,695	26,004	27,383	28,834	30,363
M-680	μ experimental (cP)	35,460	37,098	38,722	40,607	42,359	44,214	46,600
	Arrhenius (cP)	35,188	36,886	38,666	40,413	42,364	44,278	46,415
	Power Law (cP)	35,254	37,052	38,933	40,902	42,963	45,118	47,372
	Grunberg-Nissan (cP)	36,555	38,207	39,933	41,738	43,623	45,594	47,654
M-460	μ experimental (cP)	26,903	28,490	29,867	31,678	33,290	35,357	37,315
	Arrhenius (cP)	26,835	28,253	29,746	31,218	32,867	34,493	36,316
	Power Law (cP)	26,897	28,416	30,013	31,693	33,458	35,314	37,264
	Grunberg-Nissan (cP)	27,879	29,258	30,705	32,223	33,817	35,490	37,245
M-SC	μ experimental (cP)	13,341	14,382	15,385	16,254	17,458	18,700	20,005
	Arrhenius (cP)	13,261	14,065	14,977	15,886	16,850	17,872	19,031
	Power Law (cP)	13,307	14,257	15,270	16,349	17,497	18,719	20,019
	Grunberg-Nissan (cP)	13,776	14,612	15,499	16,439	17,436	18,494	19,616

Tabela 43 – Dados experimentais e teóricos para os modelos Power law, Arrhenius e Grunberg-Nissan nas misturas entre óleo lubrificante e VI.

(continua)

Óleo	Fonte do dado de viscosidade	% de VI adicionado						
		0,5%	2,0%	3,5%	5,0%	6,5%	8,0%	9,5%
M-68	μ experimental (cP)	7,6907	8,3612	9,1221	9,9460	10,818	11,775	12,801
	Arrhenius (cP)	7,5840	8,1127	8,6774	9,2810	9,9284	10,619	11,410
	Power Law (cP)	7,6190	8,2593	8,9492	9,6921	10,490	11,349	12,272
	Grunberg-Nissan (cP)	7,8798	8,4280	9,0140	9,6423	10,314	11,032	11,800
M-320	μ experimental (cP)	21,976	23,381	24,774	26,107	27,809	29,246	30,964
	Arrhenius (cP)	21,919	23,152	24,455	25,743	27,192	28,722	30,235
	Power Law (cP)	21,976	23,309	24,716	26,201	27,767	29,420	31,162
	Grunberg-Nissan (cP)	22,771	23,970	25,233	26,562	27,960	29,433	30,983
S-SC	μ experimental (cP)	6,6470	7,1732	7,7750	8,4412	9,1337	10,280	11,359
	Arrhenius (cP)	6,6152	7,0940	7,5659	8,1086	8,6910	9,3152	9,9384
	Power Law (cP)	6,6471	7,2284	7,8540	8,5305	9,2590	10,045	10,892
	Grunberg-Nissan (cP)	6,8722	7,3661	7,8951	8,4628	9,0700	9,7215	10,421
S-100	μ experimental (cP)	9,7647	10,588	11,465	12,301	13,417	14,277	15,424
	Arrhenius (cP)	9,6791	10,316	10,994	11,716	12,486	13,306	14,181
	Power Law (cP)	9,7190	10,481	11,299	12,174	13,112	14,116	15,189
	Grunberg-Nissan (cP)	10,055	10,716	11,421	12,171	12,971	13,823	14,732
SD-10W30	μ experimental (cP)	9,9221	10,744	11,354	12,445	13,283	14,412	15,221
	Arrhenius (cP)	9,9893	10,641	11,335	12,074	12,861	13,700	14,593
	Power Law (cP)	10,030	10,810	11,645	12,539	13,496	14,520	15,615
	Grunberg-Nissan (cP)	10,378	11,055	11,775	12,543	13,361	14,233	15,161

Tabela 43 – Dados experimentais e teóricos para os modelos Power law, Arrhenius e Grunberg-Nissan nas misturas entre óleo lubrificante e VI.

(conclusão)

Óleo	Fonte do dado de viscosidade	% de VI adicionado						
		0,5%	2,0%	3,5%	5,0%	6,5%	8,0%	9,5%
S-15W40	μ experimental (cP)	11,248	12,122	13,058	14,068	15,126	16,201	17,439
	Arrhenius (cP)	11,212	11,923	12,678	13,481	14,277	15,244	16,143
	Power Law (cP)	11,255	12,101	13,005	13,971	15,002	16,103	17,278
	Grunberg-Nissan (cP)	11,648	12,386	13,171	14,005	14,893	15,836	16,840
S-15W50	μ experimental (cP)	14,812	15,884	16,952	18,119	19,195	20,837	22,283
	Arrhenius (cP)	14,894	15,770	16,698	17,680	18,720	19,821	20,986
	Power Law (cP)	14,942	15,972	17,067	18,230	19,465	20,777	22,170
	Grunberg-Nissan (cP)	15,473	16,383	17,347	18,367	19,447	20,591	21,802
S-5W30	μ experimental (cP)	7,5793	8,1936	8,9027	9,6248	10,426	11,256	12,185
	Arrhenius (cP)	7,5134	8,0337	8,5600	9,1582	9,7970	10,433	11,162
	Power Law (cP)	7,5480	8,1843	8,8702	9,6071	10,401	11,254	12,172
	Grunberg-Nissan (cP)	7,8051	8,3504	8,9332	9,5562	10,223	10,937	11,700

Fonte: Elaborado pelo autor.