

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR)

VINÍCIUS SIQUEIRA FRANCH

**AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DE ÓLEOS VEGETAIS ISOLANTES COM
MATERIAIS INTERNOS DO TRANSFORMADOR**

**Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção de grau de Mestre. Área de
concentração: Engenharia e Ciência dos
Materiais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE.
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná.**

Orientador: Prof^a. Dr^a. Helena M. Wilhelm

CURITIBA

2010

Nada lhe posso dar que já não exista em você mesmo.
Não posso abrir-lhe outro mundo de imagens, além daquele que
há em sua própria alma. Nada lhe posso dar a não ser a
oportunidade, o impulso, a chave. Eu o ajudarei a tornar visível o
seu próprio mundo, e isso é tudo.

(Herman Hesse)

Este trabalho é dedicado às pessoas de
mente aberta e coração grande

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Alberto e Graciete pela dedicação, compreensão, ajuda e aos grandes valores que influenciaram minha educação e moldaram meu caráter, permitindo minha conquista de conhecimento e minha caminhada até este ponto.

À minha irmã, Alice, que me ajudou a entender melhor a psicologia da minha mente. O que me auxiliou a conhecer mais as pessoas e, principalmente, a mim.

Ao LACTEC por me conceder a oportunidade de participar deste projeto, possibilitando desenvolver uma pesquisa inovadora e me fazendo perceber mais nitidamente a relevância dos pesquisadores no Brasil.

À minha querida orientadora Dra. Helena Maria Wilhelm, pelo incentivo às minhas vitórias e pela compreensão e paciência nas minhas faltas. E, principalmente, por me guiar com desenvoltura e integridade no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Silas Batista Gomes Júnior, pelo exemplo de determinação e pelo interesse nas pesquisas relacionadas aos transformadores de energia. Sobretudo, pela força que me foi dada durante as pesquisas.

À Suely Monteiro, pela disposição, gentileza e seriedade na execução das tarefas do projeto e em todos os momentos que necessitei.

À Luciane Túlio, Leandro, Guilherme e Cheryl, pela disposição e realização de todos os ensaios físico-químicos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

À Pércia Patriarca, pela disposição, amizade e pelas discussões e apoio em laboratório.

À PRONAL, por ceder gentilmente o material da bolsa utilizado nos ensaios.

À WEG, por ceder gentilmente os corpos de prova de papel e aço silício que serviram para execução dos ensaios.

A todos por me possibilitarem, ao mesmo tempo, abarcar mais conhecimento sobre a vida.

SUMÁRIO

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	15
RESUMO.....	16
ABSTRACT	17
CAPÍTULO 1	18
1.1. INTRODUÇÃO	18
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	20
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
CAPÍTULO 2	22
2.1. FLUIDOS ISOLANTES	22
2.1.1. ÓLEO MINERAL ISOLANTE	22
2.1.1.1. ENVELHECIMENTO DO OMI EM USO E PARÂMETROS PARA AVALIAR SUA CONDIÇÃO.....	27
2.1.1.2. COMPATIBILIDADE DO OMI COM MATERIAIS	31
2.1.2. ÓLEO VEGETAL ISOLANTE	33
2.1.2.1. ENVELHECIMENTO DO OVI EM USO E PARÂMETROS PARA AVALIAR SUA CONDIÇÃO.....	38
2.1.2.2. COMPATIBILIDADE DO OVI COM MATERIAIS	42
CAPÍTULO 3	44
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.1. FLUIDOS ISOLANTES E MATERIAIS UTILIZADOS	44
3.2. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS ISOLANTES NOVOS	45
3.3. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DOS FLUIDOS ISOLANTES	48

3.4.	REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS ELASTÔMEROS	50
3.5.	OBTENÇÃO DE MISTURAS OMI/OVIs E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MESMAS.....	53
3.6.	REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DAS MISTURAS OMI/OVI COM ELASTÔMEROS	53
3.7.	REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS FLUIDOS ISOLANTES NA AUSÊNCIA E PRESENÇA DE MATERIAIS	54
3.8.	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE COMPATIBILIDADE OBTIDOS NESTE ESTUDO.....	55
	CAPÍTULO 4	56
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS ISOLANTES NOVOS.	56
4.2.	ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DOS FLUIDOS ISOLANTES COM OS MATERIAIS.....	60
4.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS ELASTÔMEROS	68
4.4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MISTURAS OMI/OVI 73	
4.5.	ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DAS MISTURAS OMI/OVI COM ELASTÔMEROS.....	75
4.5.1.	ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DE MISTURAS OMI/OVI COM BORRACHA NITRÍLICA	76
4.5.2.	ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DE MISTURAS OMI/OVI COM BORRACHA DE FLUORSILICONE.....	81
4.5.3.	ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DE MISTURAS OMI/OVI COM A BOLSA	85
4.6.	ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS FLUIDOS ISOLANTES NA AUSÊNCIA E PRESENÇA DE MATERIAIS	89
4.6.1.	ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM PAPEL KRAFT	89
4.6.2.	ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM AÇO SILÍCIO	95
4.6.3.	ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM BORRACHA DE FLUORSILICONE.....	100

4.6.4. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM A BOLSA	105
4.7. DISCUSSÃO SOBRE VALORES LIMITES ACEITÁVEIS PARA O ENSAIO DE COMPATIBILIDADE COM ÓLEO VEGETAL ISOLANTE.....	115
CAPÍTULO 5	118
5. CONCLUSÕES.....	118
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	120
REFERÊNCIAS	121

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ABB – Asea Brown Boveri

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ASTM – American Society for Testing and Materials

C_2H_2 – Acetileno

C_2H_4 – Etileno

C_2H_6 – Etano

CH_4 – Metano

CIGRÉ – Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

CIGRE – International Council of Large Electric Systems

CO – Monóxido de carbono

CO_2 – Dióxido de carbônico

COBEI – Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

Cp – Conteúdo de parafínicos

cSt – Centi Stokes

DBDS – Dibenzil Dissulfeto

DBPC – Di-terc-butil-p-cresol

FT – Força Tarefa

GT – Grupo de Trabalho

ICDL - International Conference on Dielectric Liquids

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

KOH – Hidróxido de Potássio

NBR – Norma Brasileira

ND – Não Detectado

NR – Não Registrado

OMI – Óleo Mineral Isolante

OMIs – Óleos Minerais Isolantes

OVI – Óleo Vegetal Isolante

OVIIs – Óleos Vegetais Isolantes

P&D – Pesquisa & Desenvolvimento

PCB – Bifenilapoliclorada

PRONAL – Elastomer Engineering

RETESP – Indústria de Vedantes Ltda.

SF₆ – Hexafluoreto de Enxofre

SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

WORKSPOT – International Workshop on Power Transformer

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos constituintes do OMI: (A) alcanos, (B) naftenos ou cicloalcanos e (C) aromáticos..... 24
- FIGURA 2. Vista externa (A) e interna superior (B) de um transformador de tensão. 27
- FIGURA 3. Estrutura química do aditivo antioxidante di-terc-butil-p-cresol (DBPC)..... 30
- FIGURA 4. Representação esquemática de um triacilglicerol..... 35
- FIGURA 5. (A) Efeito dos diferentes materiais testados sobre o índice de neutralização dos óleos isolantes: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e a prova em branco. 61
- FIGURA 6. (A) Efeito dos diferentes materiais testados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C dos óleos isolantes: (■) Envirotemp FR3, (●) Biovolt A e (▲) OMI. (B) Diferença entre o fator de perdas dielétricas das amostras e a prova em branco. 63
- FIGURA 7. (A) Efeito dos diferentes materiais testados sobre a viscosidade a 40 °C dos óleos isolantes: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e a prova em branco. 65
- FIGURA 8. (A) Efeito dos materiais testados sobre a tensão interfacial do (▲) OMI. (B) Diferença entre a tensão interfacial das amostras e a prova em branco. 67
- FIGURA 9. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o índice de neutralização, na presença de borracha nitrílica: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha nitrílica (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e as provas brancas. 77
- FIGURA 10. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre a viscosidade a 40 °C, na presença de borracha nitrílica: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha nitrílica (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e as provas brancas..... 78
- FIGURA 11. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C, na presença de borracha nitrílica: (●) OMI/Biovolt A e (■)

OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha nitrílica (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o fator de perdas das amostras e as provas brancas. 80

FIGURA 12. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o índice de neutralização, na presença de borracha de fluorsilicone: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha fluorsilicone (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e as provas brancas. 82

FIGURA 13. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre a viscosidade, na presença de borracha de fluorsilicone: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha fluorsilicone (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e as provas brancas. 83

FIGURA 14. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C, na presença da borracha de fluorsilicone: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha fluorsilicone (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o fator de perdas das amostras e as provas brancas. 84

FIGURA 15. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o índice de neutralização, na presença da bolsa: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da bolsa: (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e as provas brancas. 86

FIGURA 16. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre a viscosidade, na presença da bolsa: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da bolsa: (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e as provas brancas. 87

FIGURA 17. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C, na presença da bolsa: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da bolsa: (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o fator de perdas das amostras e as provas brancas. 88

FIGURA 18. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de papel Kraft isolante: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de papel Kraft isolante: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco. 90

FIGURA 19. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de papel Kraft isolante: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de

papel Kraft isolante: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco. 91

FIGURA 20. (A) Variação da viscosidade cinemática a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de papel Kraft isolante: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de papel Kraft isolante: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco..... 93

FIGURA 21. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença de papel Kraft isolante: (▲) OMI; e na ausência de papel Kraft isolante: (Δ) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco. 94

FIGURA 22. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de aço silício: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco. 96

FIGURA 23. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de aço silício: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco. 97

FIGURA 24. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de aço silício: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco. 98

FIGURA 25. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença de aço silício: (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (Δ) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco. 99

FIGURA 26. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha de fluorsilicone: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha de fluorsilicone: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco. .. 101

FIGURA 27. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha de fluorsilicone: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na

ausência da borracha de fluorsilicone: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco.. 102

FIGURA 28. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha de fluorsilicone: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha de fluorsilicone: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco. 103

FIGURA 29. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença da borracha de fluorsilicone: (▲) OMI; e na ausência da borracha de fluorsilicone: (Δ) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco..... 104

FIGURA 30. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da bolsa: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco. 106

FIGURA 31. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da bolsa: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco. 107

FIGURA 32. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da bolsa: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR e (Δ) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco..... 108

FIGURA 33. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença da bolsa: (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (Δ) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco. 109

Figura 34. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha nitrílica: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha nitrílica: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco..... 110

Figura 35. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha nitrílica: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência

da borracha nitrílica: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco. 111

Figura 36. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha nitrílica: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha nitrílica: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR e (Δ) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco..... 112

Figura 37. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença da borracha nitrílica: (▲) OMI; e na ausência da borracha nitrílica: (Δ) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco..... 114

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Características do OMI novo.	25
TABELA 2. Valores de referência para OMI em uso.	28
TABELA 3. Características do OVI novo.	37
TABELA 4. Ensaio de caracterização realizados nos OVIs, de acordo com a especificação da norma ABNT NBR 15422.	46
TABELA 5. Ensaio de caracterização realizados no OMI, de acordo com a resolução 36 da ANP de 05/12/2008.	47
TABELA 6. Ensaio de caracterização aplicados aos elastômeros.	51
TABELA 7. Ensaio de resistência química dos elastômeros com os óleos. ...	52
TABELA 8. Caracterização físico-química dos OVIs novos.	58
TABELA 9. Caracterização físico-química do OMI novo.	59
TABELA 10. Resultados de identificação das borrachas.	68
TABELA 11. Resultados de Dureza shore A.	68
TABELA 12. Ensaio de caracterização dos elastômeros antes e após o teste de envelhecimento térmico.	69
TABELA 13. Ensaio de resistência química dos elastômeros aos óleos vegetais e mineral isolantes.	72
TABELA 14. Caracterização físico-química de misturas OMI/OVI (Envirotemp FR3).	74
TABELA 15. Caracterização físico-química de misturas OMI/OVI (Biovolt A)..	75
TABELA 16. Variação do índice de neutralização. Valor limite para esse parâmetro na ABNT NBR 14274: aumento de 0,02 mg KOH.g óleo ⁻¹	116
TABELA 17. Variação da viscosidade. Não há valor limite para esse parâmetro na ABNT NBR 14274.	117
TABELA 18. Variação do fator de perdas dielétricas a 90°C. Valor limite para esse parâmetro na ABNT NBR 14274: aumento de 0,5%.	117

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da compatibilidade de óleos vegetais isolantes (OVIs) com materiais internos de transformadores de distribuição, como papel isolante, tinta, aço silício e elastômeros, para avaliar o efeito do material teste nas propriedades físico-químicas dos OVIs. Foram avaliados dois fluidos vegetais isolantes procedentes de diferentes fornecedores (Envirotemp FR3 e Biovolt A). Adicionalmente, foi avaliado o óleo mineral isolante (OMI) a título de comparação com os diferentes fluidos vegetais testados. Os fluidos isolantes foram analisados antes e após os ensaios de compatibilidade por meio de ensaios físico-químicos específicos, como viscosidade cinemática, índice de neutralização (acidez), fator de perdas dielétricas e também a tensão interfacial no caso do OMI.

Os fluidos isolantes foram utilizados tais como entregues pelos fornecedores. Os ensaios de compatibilidade foram realizados em estufa, a 105⁰C, em frascos fechados, por um período de 164 horas. Ao término do ensaio foram realizados os ensaios físico-químicos no fluido isolante. No caso dos elastômeros também foram realizados ensaios mecânicos antes e após os ensaios de compatibilidade. A relação entre a quantidade de óleo e de material teste utilizada neste estudo foi a mesma descrita na norma ABNT NBR 14274 (parte B), que trata do ensaio de compatibilidade de OMI com materiais internos do transformador. Também foram realizados ensaios nos óleos puros sem o material teste, denominado neste estudo de prova em branco, nas mesmas condições dos ensaios realizados com o material teste, para avaliar o efeito das condições de realização do teste na variação dos parâmetros físico-químicos do óleo. Para avaliar o efeito da presença do material teste no óleo foi obtida a diferença entre os valores dos parâmetros físico-químicos da prova em branco e do óleo ensaiado com o material teste. O efeito dos OVIs nas propriedades dos elastômeros foi analisado neste estudo por ensaios mecânicos em corpos de provas destes materiais, antes e após os testes de compatibilidade.

Palavras-chave: óleo vegetal isolante; fluidos isolantes; compatibilidade; transformadores; ésteres naturais; fluidos isolantes biodegradáveis.

ABSTRACT

The main objective of this work was to test the effects of insulating vegetable oils (IVOs) on the physical-chemical properties of the internal materials of distribution transformers, namely insulating paper, paint, silicon steel and elastomers, to assess their compatibility with IVOs. Two insulating vegetable fluids were analyzed, from two suppliers (Envirotemp FR3 and Biovolt A), along with insulating mineral oil (IMO) for comparison. The fluids were analyzed before and after the compatibility tests by specific assays to measure their physical and chemical parameters, such as kinetic viscosity, acid neutralization index, dielectric loss factor and also the interfacial tension in the case of the IMO.

The insulating fluids were used as received from the suppliers. The compatibility tests were conducted in a heated chamber at 105 °C, in closed flasks for a period of 164 hours, after which the various physical and chemical parameters of interest were measured. In the case of the elastomers, mechanical tests were also performed before and after the compatibility tests. The ratio between the quantity of oil and test material was as described in the ABNT NBR 14274 standard (part B), which covers tests of the compatibility of IMOs with internal transformer materials. Tests were also conducted on the oils without the test materials (blank tests), under the same conditions as in the tests with the materials, to assess the effect of the testing conditions on the variation in the parameters measured. The effect of each material was thus considered to be the difference between the parameters after subjecting the oil to the test conditions with and without the materials. The effect of the IVOs on the properties of the elastomers was analyzed by mechanical tests on specimens of these materials, before and after the compatibility tests.

Keywords: Insulating vegetable oil; insulating fluids; compatibility; transformers; natural esters; biodegradable insulating fluids.

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUÇÃO

Os equipamentos utilizados na transmissão e distribuição de energia elétrica apresentam hoje um isolamento, predominantemente, à base de papel e óleo mineral isolante (OMI). Recentemente o OMI tem apresentado alguns problemas durante a sua utilização como:

1. A ocorrência de falhas em reatores devido à presença de enxofre corrosivo.
2. Contaminação de solo e de sistemas hídricos, no caso de vazamentos ou derramamentos, em virtude de seu lento processo de biodegradação.
3. Ocorrência de incêndios em função de seu baixo ponto de combustão ($\sim 150^{\circ}\text{C}$).

Estes problemas freqüentemente causam impactos ambientais e, por conseguinte, consideráveis impactos econômicos para as concessionárias de energia. Tendendo eliminar ou minimizar estes impactos, o óleo vegetal isolante (OVI) entrou no mercado nacional como uma alternativa ao OMI, justificado pelas seguintes principais características:

1. Ausência de enxofre corrosivo na sua composição química.
2. Sua rápida biodegradação, por se tratar de um produto natural, derivado de oleaginosas.
3. Maior resistência ao incêndio uma vez que seu ponto de combustão é em torno de duas vezes superior ao do OMI.

Apesar destas características favoráveis, o uso do OVI ainda é limitado no Brasil principalmente em função do conservadorismo do setor elétrico, por se tratar de um produto novo no mercado e, devido à falta de comprovação técnica quanto à sua compatibilidade com os materiais internos do transformador tradicionalmente utilizados em equipamentos isolados com OMI.

Testes de compatibilidade do fluido isolante com materiais internos do transformador são realizados pelos fabricantes destes equipamentos e exigidos pelos seus clientes. Este ensaio é normatizado para o OMI na norma ABNT NBR 14274. No entanto, atualmente ainda não existe norma específica para OVI. Este ensaio é importante porque a incompatibilidade do fluido isolante com elastômeros, por exemplo, utilizados em vedações e gaxetas, pode originar vazamentos do fluido isolante. Portanto, a compatibilidade destes dois materiais é fundamental para garantir a estanqueidade do equipamento e a minimização de impactos ambientais decorrentes de vazamentos.

Esta dissertação contribuiu na elaboração de uma norma nacional para o ensaio de compatibilidade de materiais com OVI.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar a compatibilidade de óleos vegetais isolantes (OVIs) com materiais internos do transformador.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as características físico-químicas de OVIs de dois fabricantes distintos e do óleo mineral isolante (OMI) antes dos testes de compatibilidade.
- Realizar testes de compatibilidade dos OVIs e do OMI com materiais internos do transformador, como tinta, papel Kraft isolante, aço silício e elastômeros.
- Avaliar as características físico-químicas dos fluidos isolantes após os testes de compatibilidade.
- Realizar ensaios mecânicos nos elastômeros antes e após os ensaios de compatibilidade com os fluidos isolantes.

- Contribuir para elaboração de uma norma técnica (ABNT NBR) para realização de ensaios de compatibilidade de materiais internos do transformador com OVI.

CAPÍTULO 2

2.1. FLUIDOS ISOLANTES

Diversos são os meios isolantes comumente usados em equipamentos elétricos, podem ser gasosos como o ar ou hexafluoreto de enxofre (SF_6), líquidos como o OMI ou o óleo sintético e, sólidos como as resinas epóxi ou fibra de vidro.

2.1.1. ÓLEO MINERAL ISOLANTE

O OMI oriundo do refino de petróleo tem sido usado como líquido isolante em transformadores há mais de um século. Bilhões de litros deste óleo estão sendo usados em equipamentos elétricos em todo o mundo. Sua popularidade se deve à disponibilidade e baixo custo. Além de ser um excelente meio de isolamento e de resfriamento (CLAIBORNE e CHERRY, 2006).

O OMI utilizado em equipamentos elétricos é obtido pela destilação do petróleo, correspondendo à fração obtida entre 300 a 400 °C. Este líquido pode ser de origem parafínica ou naftênica (LIPSTEIN, SHAKHNOVICH, 1970 e CLARK, 1962). Trata-se de uma mistura de compostos na qual a maioria das moléculas é constituída por hidrocarbonetos e, em pequenas quantidades, por

compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura (WILSON, 1980).

Os hidrocarbonetos podem ser divididos em três grupos: parafinas ou alcanos, naftenos ou cicloalcanos e aromáticos (Figura 1). Sendo cada um destes grupos definidos conforme segue:

- Parafinas ou alcanos: hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada (Figura 1-A);
- naftenos ou cicloalcanos: hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, sendo que estes podem possuir uma ou mais cadeias laterais lineares ou ramificadas (Figura 1-B);
- aromáticos: hidrocarbonetos aromáticos contendo um ou mais anéis benzênicos que podem ser combinados com anéis alicíclicos, podendo ou não apresentar cadeias laterais (Figura 1-C).

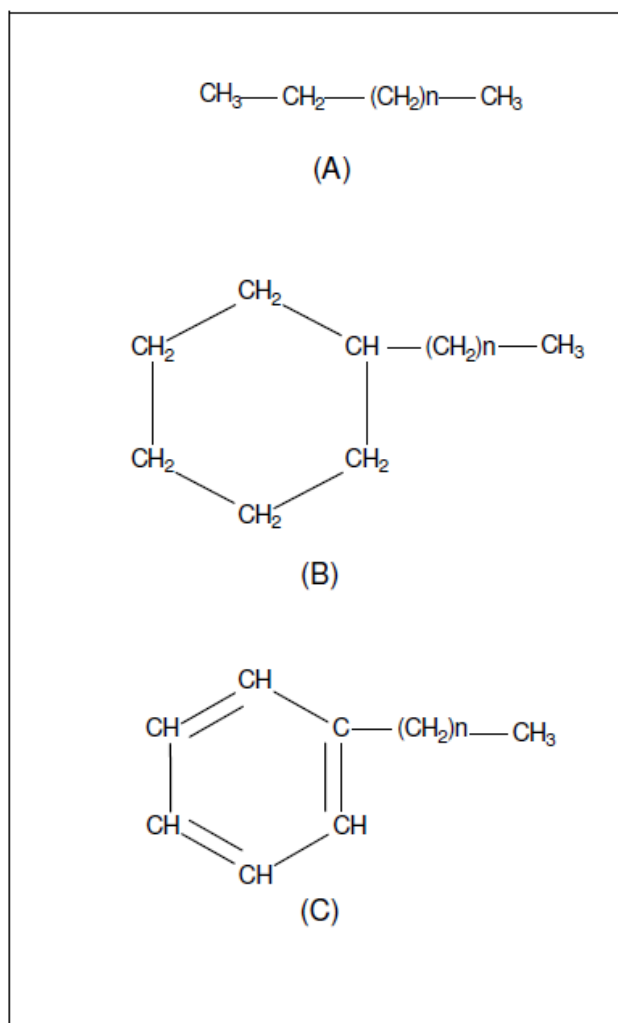


FIGURA 1. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos constituintes do OMI: (A) alcanos, (B) naftenos ou cicloalcanos e (C) aromáticos.

A classificação do OMI em parafínico ou naftênico é, normalmente, realizada segundo a norma ASTM D2140 (2003), por meio de medidas de viscosidade, densidade, índice de refração e pela correlação entre estes resultados em um diagrama ternário (ASTM D2141, 1980). Alternativamente, a classificação do OMI em parafínico ou naftênico pode ser realizada com a utilização da técnica de espectroscopia na região do infravermelho, pela determinação do seu conteúdo parafínico (CP). Óleos com CP inferiores à 50% são considerados naftênicos enquanto que aqueles com CP iguais ou

superiores à 56% são classificados como parafínicos. Os óleos com valores de CP entre 50 e 56% são classificados, em geral, como óleos intermediários (NYNÄS, 2004).

Óleos minerais isolantes (OMIs) novos devem atender às especificações constantes na Resolução 36 da ANP, de 05.12.2008 (ANP, 2008), para óleo naftênico e parafínico. A Tabela 1 ilustra alguns dos ensaios e os valores limites contidos nesta resolução.

TABELA 1. Características do OMI novo.

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado	
			Naftênico	Parafínico
Aspecto visual	-	Visual	O óleo deve estar claro, límpido e isento de materiais em suspensão	
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máx.	
Massa específica a 20 °C	kg.(m ³) ⁻¹	ABNT NBR 7148	861 – 900	860 máx.
Viscosidade cinemática 20 °C 40 °C 100 °C	cSt	ABNT NBR 10441	25 máx. 12 máx. 3 máx.	
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	140 mín.	
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 39 máx.	- 12 máx.
Rigidez dielétrica Eletrodo de disco Eletrodo de calota	kV	ABNT NBR 6869 ABNT NBR IEC 60156	30 mín. 42 mín.	
Rigidez dielétrica a impulso		ASTM D 3300	145 mín.	

TABELA 1. CONTINUAÇÃO. Características do OMI novo.

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado	
			Naftênico	Parafínico
Fator de perdas dielétricas 25 °C 90 °C 100 °C	%	ABNT NBR 12133	0,05 máx. 0,40 máx. 0,50 máx.	
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo	
Índice de neutralização	mg KOH.(g óleo) ⁻¹	ABNT NBR 14248	0,03 máx.	
Teor de água	mg.kg ⁻¹	ABNT NBR 10710 B	35	
Bifenila policlorada (PCB)	mg.kg ⁻¹	ABNT NBR 13882 B	Não detectável	
Cloretos e sulfatos	-	ABNT NBR 5779	Ausente	
Tensão interfacial a 25 °C	mN.m ⁻¹	ABNT NBR 6234	40 mín.	
Aditivo inibidor de oxidação DBPC Óleo não inibido Óleo inibido	% massa	ABNT NBR 12134 A	Não detectável 0,33 máx.	
Estabilidade à oxidação (óleo não inibido) Índice de neutralização Borra Fator de perdas dielétricas a 90 °C	mg KOH.(g óleo) ⁻¹ % massa %	ABNT NBR 10504	0,40 máx. 0,10 máx. 20 máx.	

Fonte: Adaptado da Resolução 36 da ANP de 2008 (ANP, 2008).

2.1.1.1. ENVELHECIMENTO DO OMI EM USO E PARÂMETROS PARA AVALIAR SUA CONDIÇÃO

Durante a operação do equipamento, o OMI envelhece e, conseqüentemente, mudanças consideráveis ocorrem nas suas propriedades físicas, químicas e elétricas. Tais como:

- aceleração do processo de degradação da celulose;
- deterioração das propriedades isolantes do óleo;
- formação de borra (material que é depositado na parte ativa dos transformadores, dificultando as trocas de calor).

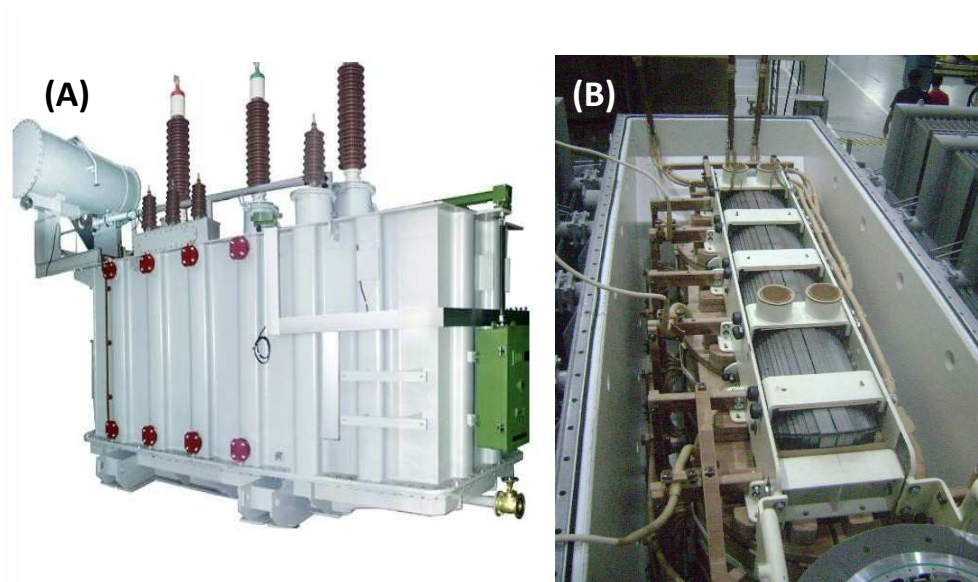


FIGURA 2. Vista externa (A) e interna superior (B) de um transformador de tensão.

Para o acompanhamento de óleos isolantes em uso, normalmente são realizados os ensaios de rigidez dielétrica, teor de água, tensão interfacial, índice de neutralização e fator de potência. Estes ensaios permitem diagnosticar o estado em que se encontra o OMI (TULIO, 2008). Na Tabela 2 estão apresentados valores limites de referência para este tipo de óleo.

Durante a utilização do óleo isolante no equipamento, este está sujeito a um processo de oxidação, formando ácidos como produtos finais da degradação que podem ser mensurados por meio do índice de neutralização ou índice de acidez. No caso do OMI, estes compostos, a partir de certa concentração, são indesejáveis, pois agredem os materiais do equipamento, principalmente o papel Kraft isolante, diminuindo, conseqüentemente, a sua vida útil. Tais compostos podem, ainda, polimerizar e formar borra, que ao se depositar na parte ativa ou nos trocadores de calor, dificulta a dispersão de calor para o meio ambiente (GRANATO, LEVY e TULIO, 2001).

TABELA 2. Valores de referência para OMI em uso.

Característica	Unidade	Norma ABNT	Limite para uso
Índice de neutralização	mg KOH.(g óleo) ⁻¹	NBR 14248	0,15 máx.
Teor de água	ppm (mg/kg)	NBR 10710 B	35 máx.
Fator de potência a 100 °C	%	NBR 12133	15,0 máx.
Rigidez dielétrica	kV	NBR 6869	30 mín.
Tensão interfacial	mN/m	NBR 6234	20,0 mín.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 10576, 2006 (ABNT, 2006).

O OMI possui compostos orgânicos à base de enxofre que, segundo a literatura, são termicamente estáveis e inibidores naturais do processo de oxidação e conseqüentemente, do seu envelhecimento térmico. A partir de 2004, começaram a surgir problemas de falhas em transformadores devido ao enxofre corrosivo, no Brasil, com maior incidência em reatores. Até agora, mais de uma dezena de equipamentos de diferentes fabricantes e usuários já falharam no Brasil. Durante as inspeções foi encontrada uma substância de coloração preta aderida nas superfícies dos barramentos de cobre, dos condutores das espiras e do papel de recobrimento destas, deixando as superfícies enegrecidas e de aparência corroída. As análises realizadas em diversos laboratórios indicaram que esta substância era predominantemente formada por enxofre e cobre, mais especificamente sulfeto de cobre, material este oriundo da deterioração por corrosão direta da superfície do cobre. Ficou constatado a partir das pesquisas, que o enxofre corrosivo era proveniente do OMI utilizado. Rastreado a origem dos diferentes óleos, foi observado que a totalidade dos equipamentos que falharam utilizava óleo fornecido por um único fabricante, em várias denominações, contendo altas concentrações de um composto à base de enxofre, o dibenzildissulfeto ou DBDS (CIGRÉ DO BRASIL, 2005 e CIGRÉ DO BRASIL, 2006). Atualmente, trabalhos estão sendo realizados no setor elétrico visando à remoção ou “inativação” do DBDS nos óleos em uso, para minimizar o fator de baixa confiabilidade no sistema de fornecimento de energia (CIGRÉ INTERNACIONAL, 2009).

Ao OMI podem ser adicionados inibidores sintéticos como o di-terc-butil-*p*-cresol (DBPC), em teores que podem chegar a no máximo 0,33 % (m/m), de acordo com a Resolução 36 da ANP, de 05/12/2008 (ANP, 2008). Estes

inibidores de oxidação auxiliam a estender a vida útil dos óleos minerais. O DBPC é o aditivo mais utilizado (Figura 2).

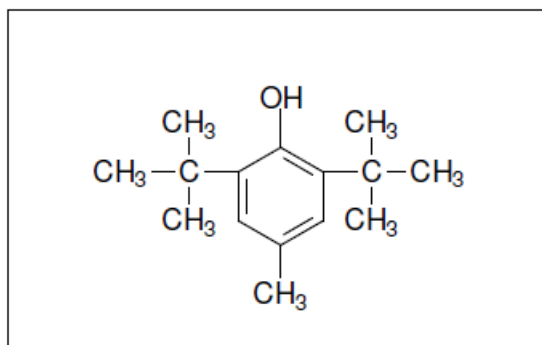


FIGURA 3. Estrutura química do aditivo antioxidante di-terc-butil-p-cresol (DBPC).

O processo que rege a oxidação dos hidrocarbonetos é o mecanismo de peroxidação, levando a formação de hidroperóxidos. Após a formação destes compostos, muitos subprodutos de oxidação são formados, os quais diferem de acordo com a espécie que lhes deu origem (LIPSHTEIN; SHAKHNOVISH, 1970).

Os subprodutos formados, também chamados de produtos intermediários, são álcoois, aldeídos e cetonas, os quais, na presença de oxigênio, geram ácidos carboxílicos e ésteres. Devido a sua natureza polar e ácida, os ácidos carboxílicos são agentes agressivos ao papel isolante e demais materiais presentes no transformador. Na etapa final do processo oxidativo do OMI ocorrem reações de polimerização, onde, várias moléculas reagem formando compostos de massa molar elevada que se depositam na forma de borra. Esta borra, insolúvel e de característica ácida, deposita-se sobre os enrolamentos,

prejudicando a transferência de calor do cobre para o óleo, elevando a temperatura do papel isolante, atacando-o quimicamente (MILASH, 1984).

A partir do momento em que as propriedades físico-químicas do OMI em uso no transformador não atenderem mais as características de dielétrico, ou seja, quando o fluido apresentar um alto grau de deterioração oxidativa e térmica, este é substituído por um novo fluido ou submetido a um processo regenerativo. A substituição ou a regeneração de um OMI que não atende às características de dielétrico é extremamente importante para evitar a degradação prematura do isolamento sólido do transformador (UHREN, 2007).

Na última década a pesquisa e utilização de técnicas de inteligência artificial aplicadas à análise de gases dissolvidos no óleo têm evoluído significativamente. Vários fatores contribuíram para este fato: a evolução e domínio de aplicação destas técnicas a outros campos de diagnóstico, a facilidade de integração de várias informações e dados, inclusive de diferentes origens, para o auxílio à decisão, o aumento do volume de informações em função do número de equipamentos supervisionados e da importância e reflexos de uma tomada de decisão quanto ao estado de um equipamento (ZÜRN, ZIRBES e ROLIM, 2005).

2.1.1.2. COMPATIBILIDADE DO OMI COM MATERIAIS

O objetivo do teste de compatibilidade é avaliar o efeito resultante das interações químicas entre os diferentes materiais e entre os materiais e seus

ambientes. Por este conceito, cada material é analisado em termos de sua composição química. Uma vez que diferentes estruturas químicas estão em íntimo contato umas com as outras e com seus ambientes, podem haver interações. Incompatibilidade significa que diferentes estruturas químicas interagem acelerando a degradação das estruturas dos materiais, resultando em uma vida útil reduzida.

Existem duas maneiras de considerar a compatibilidade dos materiais e do óleo. Os materiais impactam o óleo isolante de forma negativa? O óleo afeta o desempenho dos materiais utilizados? Em transformadores preenchidos com óleo, por exemplo, o óleo é o isolante mais importante. Por esta razão é imperativo que os materiais utilizados na construção das bobinas não afetem a capacidade do óleo de isolar e de dispersar calor. Para avaliar a compatibilidade dos materiais do transformador com o óleo mineral isolante (OMI) pode ser utilizado o ensaio da norma ASTM D3455 "Compatibility of Construction Material with Electrical Insulating Oil of Petroleum Origin" ou da norma nacional ABNT NBR 14274 "Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo mineral isolante". Neste método de ensaio várias propriedades do óleo isolante novo (antes dos ensaios de compatibilidade, óleo não-envelhecido), óleo isolante envelhecido sem o material teste (chamado de prova em branco) e do óleo envelhecido com o material teste, são testadas, tais como rigidez dielétrica, tensão interfacial, fator de perdas dielétricas, índice de neutralização (MAGEE, 2008).

Testes de compatibilidade do OMI com os materiais internos do transformador são realizados pelos fabricantes destes equipamentos e exigidos pelos seus clientes.

Segundo a norma ABNT NBR 14274 os seguintes critérios são suficientes para indicar a incompatibilidade dos materiais com OMI:

1. Aumento da tangente delta superior a 0,50% em relação à prova em branco.
2. Redução da tensão interfacial superior a 5 dinas/cm em relação a prova em branco.
3. Aumento do índice de neutralização superior a $0,02 \text{ mg KOH} \cdot (\text{g de óleo})^{-1}$ em relação a prova em branco.

2.1.2. ÓLEO VEGETAL ISOLANTE

Com a perspectiva da tendente diminuição na oferta do petróleo, em conjunto com a necessidade de fluidos biodegradáveis devido às preocupações ambientais, fontes alternativas ao OMI vêm sendo procuradas e ofertadas. Fluidos sintéticos de hidrocarbono, silicone e éster sintético foram introduzidos na segunda metade do século 20, mas seu uso ficou limitado aos transformadores de distribuição. Os ésteres sintéticos, apesar de biodegradáveis, não tiveram o uso consolidado no setor elétrico nacional devido ao seu custo elevado.

A partir da década de 1990, uma nova classe de fluidos isolantes obtida de oleaginosas foi desenvolvida para uso em transformadores que, devido principalmente às suas características biodegradável e renovável, foram

denominados de 'fluidos ecologicamente corretos'. Além disso, são considerados fluidos de segurança por terem ponto de combustão > 300 °C.

Foram desenvolvidos, por volta de 1999, óleos vegetais apropriados para uso em equipamentos elétricos (LEWAND, 2004). Os primeiros produtos comerciais de OVLs lançados no mercado nacional foram o Biotemp e o Envirotemp FR3. Em 2003, foram lançados, no mercado nacional, os óleos Biovolt (WILHELM, 2008).

Atualmente, no Brasil, o fluido Envirotemp FR3 é comercializado pela Cooper Power Systems e fabricado pela Cargill, enquanto que o Biotemp é importado da Suécia pela ABB Brasil. Os óleos Biovolt são produzidos e comercializados por uma empresa paranaense, a Mineraltec, instalada em Pato Branco (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009).

O óleo vegetal é formado por moléculas de acilgliceróis, que são originárias da condensação entre ácidos graxos e o glicerol (tri-álcool), formando ésteres de ácidos graxos. Assim, estes compostos são classificados em mono, di ou triacilgliceróis, dependendo se uma, duas ou três moléculas de ácido graxo se associa(m) covalentemente ao glicerol, respectivamente, formando ésteres de ácido graxo. Os óleos vegetais são formados predominantemente por triacilgliceróis (Figura 3), que podem ser formados por ácidos graxos iguais ou diferentes entre si, dependendo da origem da matéria prima, saturados ou insaturados (MORETTO e FETT, 1998).

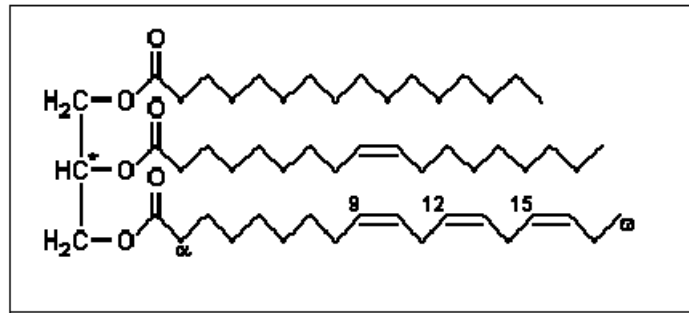


FIGURA 4. Representação esquemática de um triacilglicerol.

Os transformadores são considerados pelas companhias de seguro e gerentes de risco como os equipamentos mais críticos de uma planta industrial, dado a existência simultânea de uma grande quantidade de óleo e elementos submetidos a altas tensões elétricas. Explosões ou incêndios podem ocorrer nas redes de abastecimento e, com isso, gerar repercussões consideráveis, tanto para as companhias de energia elétrica como para a comunidade em geral (ROLLAND, 2004). Os OVIs apresentam alto ponto de combustão, tornando-os menos inflamáveis que o OMI e contribuindo para a redução do risco a incêndios.

O OMI apresenta baixa biodegradabilidade, podendo, em caso de vazamentos ou derramamentos, contaminar o solo e os recursos hídricos. As agências regulatórias ambientais do governo impõem altas penalidades às empresas quando da notificação de acidentes desta natureza. Além deste desembolso financeiro, as empresas precisam adotar medidas para remediar os sistemas impactados, que geralmente, são baseadas em processos bastante onerosos. Por ser biodegradável, o OVI é facilmente degradado pelos microorganismos no meio ambiente, sendo que 95% ou mais destes produtos biodegradam no ensaio de 28 dias (WILHELM, TULIO e UHREN, 2009). Assim,

é esperado que o processo de remediação dos sistemas impactados com estes fluidos seja mais simples e mais barato em relação ao do OMI (CLAIBORNE e CHERRY, 2006).

O OMI é originário do petróleo, que é uma fonte finita, recurso não-renovável, cuja escassez está alarmando todos os continentes. Os óleos vegetais são produtos naturais, provenientes de fontes renováveis. São considerados renováveis porque o gás carbônico (CO₂) liberado na sua combustão ou degradação é reciclado por absorção durante o próprio crescimento das oleaginosas no processo conhecido como fotossíntese.

Para avaliação dos OVIs novos, foi publicada, em 2006, a norma ABNT NBR 15422 “OVI para Equipamentos Elétricos”. Esta norma foi elaborada com base no estudo da força tarefa FT-02 do grupo de trabalho de líquidos isolantes GT D1.01 do CIGRÉ (Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica), responsável pela definição dos ensaios de aceitação deste novo fluido e na norma ASTM D6871 “Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus”. Os OVIs novos quando ensaiados segundo os métodos indicados na norma ABNT NBR 15422, devem apresentar características de acordo com os valores limites especificados na Tabela 3.

TABELA 3. Características do OVI novo.

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado
Aspecto visual	-	Visual	O óleo deve estar claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máx.
Densidade relativa à 20/4 °C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máx.
Viscosidade cinemática 20 °C 40 °C 100 °C	cSt	ABNT NBR 10441	150 máx. 50 máx. 15 máx.
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mín.
Ponto de combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mín.
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 10 máx.
Rigidez dielétrica Eletrodo de disco Eletrodo de calota	kV	ABNT NBR 6869 ABNT NBR IEC 60156	30 mín. 42 mín.
Rigidez dielétrica a impulso		ASTM D 3300	130 mín.
Fator de perdas dielétricas 25 °C 90 °C 100 °C	%	ABNT NBR 12133	0,20 máx. 3,6 máx. 4,0 máx.
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Índice de neutralização	mg KOH.(g óleo) ⁻¹	ABNT NBR 14248	0,06 máx.
Teor de água	mg.kg ⁻¹	ABNT NBR 10710 B	200
Bifenila policlorada (teor de PCB)	mg.kg ⁻¹	ABNT NBR 13882 B	Não detectável

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15422, 2006 (ABNT, 2006).

2.1.2.1. ENVELHECIMENTO DO OVI EM USO E PARÂMETROS PARA AVALIAR SUA CONDIÇÃO

No caso do OVI em uso, ainda não existem, no Brasil, normas técnicas de análise para efeito de manutenção preventiva em equipamentos elétricos. Estudos estão sendo feitos com a intenção de definir quais as características mais importantes de controle e seus respectivos valores limites (WILHELM, 2006). A nível mundial foi publicado pela IEEE, em 2008, um guia com esta finalidade (IEEE, 2008). Tulio, em sua dissertação de mestrado, indicou a viscosidade cinemática, o índice de neutralização (acidez), fator de perdas dielétricas e o teor de umidade como os principais parâmetros que devem ser monitorados no OVI em uso (TULIO, 2008).

A natureza química do OVI é diferente da natureza do OMI. O OVI possui um caráter mais polar enquanto que o do mineral é apolar. Esta diferença se reflete nas suas propriedades físico-químicas e na estabilidade à oxidação (WILHELM et al, 2007).

Até o momento, não existe metodologia normalizada a nível nacional e internacional para avaliação da estabilidade à oxidação de OVIs novos. E, também, não há referências bibliográficas reportando se a oxidação destes óleos segue o mesmo comportamento dos óleos vegetais comestíveis, pois aditivos antioxidantes podem ter sido adicionados para melhorar a sua resistência à oxidação (TULIO, 2008).

O período de permanência de óleos e gorduras vegetais em prateleira é geralmente determinado a partir da estabilidade à oxidação, verificada pelo

método condutivimétrico. Foi apresentado, na força-tarefa de óleo vegetal isolante do Grupo de Materiais Isolantes e Novas Tecnologias (GT D1.01) do Comitê Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Cigré do Brasil), um relatório técnico onde foi utilizado o método condutivimétrico para avaliar a estabilidade à oxidação de OVIs novos, a partir da determinação do período de indução (WILHELM e STOCCO, 2007). Neste trabalho, os autores concluíram que este método pode ser utilizado como ferramenta para análise comparativa da estabilidade à oxidação de OVIs novos (WILHELM, 2008).

Dependendo das condições de operação do equipamento, da qualidade do óleo e do teor de umidade do papel Kraft isolante, o mecanismo de degradação dos OVIs pode ocorrer via oxidação ou hidrólise, passível de monitoramento por ensaios físico-químicos específicos (WILHELM et al, 2007).

O mecanismo de degradação predominante para o OMI é o da peroxidação. Para o OVI o mecanismo predominante dependerá do teor de oxigênio e do teor de água do sistema isolante (óleo e papel). No caso de equipamentos operando com vazamentos, com entrada de ar, o mecanismo predominante será o da oxidação, refletido pelo aumento da viscosidade. Em equipamentos selados, a degradação do óleo se dará pela via hidrolítica, refletido pelo aumento no índice de neutralização (WILHELM et al, 2007).

Viscosidade, índice de neutralização e fator de perdas dielétricas a 90 °C são parâmetros importantes e que devem ser inseridos nos ensaios de manutenção preditiva de equipamentos isolados a óleo vegetal (WILHELM et al, 2007).

Os índices de neutralização típicos dos OVIs são normalmente mais altos do que os do OMI. OVIs oxidados tendem a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o OMI tende a formar ácidos orgânicos de cadeia curta, sendo estes muito mais agressivos em comparação aos primeiros (WILHELM et al, 2006). Adicionalmente, a literatura reporta que os produtos de oxidação do OVI não são nocivos ao papel Kraft isolante, ao contrário, evitam a sua degradação precoce (RAPP, McSHANE e LUKSICH, 2005). E, se eventualmente os produtos de oxidação do OVI polimerizarem, esta polimerização não gera borra ou depósitos sobre os materiais internos do transformador.

A umidade sempre está presente nos líquidos isolantes, em quantidades que variam principalmente com a estrutura química dos mesmos, isto é, fluidos polares apresentam maior afinidade com a água que os apolares, e varia, também, com as condições de tratamento, manipulação e de armazenamento as quais os fluidos foram submetidos.

A rigidez dielétrica do OVI é da mesma magnitude do OMI e começa a diminuir quando a saturação relativa de água no óleo atinge aproximadamente 50%. Para o OMI, 50% da saturação a temperatura ambiente corresponde ao intervalo entre 30 a 35 mg.kg⁻¹ de água e para o OVI, de 500 a 600 mg.kg⁻¹ de água (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2003). Ou seja, a quantidade de água exigida para saturar o OVI à temperatura ambiente é aproximadamente 20 vezes a do OMI (IEEE, 2008).

É importante adquirir informações sobre o envelhecimento do papel isolante imerso em óleo isolante, tendo em vista que a vida útil de um transformador é dada pela vida útil de seu isolamento sólido (MARTINS, 2008).

A umidade no OMI atua como agente catalisador na decomposição da celulose, diminuindo, logo, a vida útil do equipamento elétrico. Devido a sua natureza química, o OVI apresenta grande afinidade com a água. Esta propriedade contribui para o aumento da vida útil da isolação sólida. Os resultados de estudos de envelhecimento mostraram que o papel isolante tem sua vida estendida na presença de óleos de base vegetal em comparação aos transformadores isolados com óleo mineral (CLAIBORNE e CHERRY, 2006). Segundo Rapp e colaboradores a água no óleo vegetal é consumida no processo de hidrólise do triacilglicerol (molécula do OVI) gerando ácidos graxos livres de cadeia longa (RAPP et al, 2001; RAPP et al, 2002 e RAPP et al, 2005). Este mecanismo de hidrólise favorece o deslocamento de mais moléculas de água do papel para o fluido isolante para manter o equilíbrio químico, ou seja, indiretamente este deslocamento promove a secagem do papel Kraft isolante e, por conseguinte, a extensão da sua vida útil.

Adicionalmente, a literatura reporta que os compostos ácidos livres de cadeia longa formados a partir da hidrólise do triacilglicerol reagem com as hidroxilas da celulose via reação de esterificação, impedindo a degradação da celulose por estes sítios ativos (RAPP et al, 2005), ou seja, evitando sua degradação precoce. Estes trabalhos mostram os benefícios que o óleo vegetal pode trazer para o papel Kraft isolante quanto à extensão da sua vida útil. Resultados obtidos por Wilhelm e colaboradores chamam a atenção para o OVI que, nestas condições, é sacrificado precocemente em função do processo de

hidrólise (WILHELM et al, 2006). Não há dados disponibilizados pelos fabricantes destes fluidos quanto à vida útil do óleo vegetal comparativamente ao OMI, tão pouco quanto à frequência de processo de troca ou ao processo de regeneração do fluido degradado.

Na faixa de temperaturas 70 °C-130 °C, a velocidade de degradação do papel é um pouco superior no óleo vegetal isolante, em relação à verificada no OMI. Para temperaturas superiores a 130 °C/140 °C, a velocidade de degradação do papel no OVI é um pouco inferior a que ocorre no OMI (MARTINS, 2008).

Estas observações, relativas à degradação do papel num e nouro tipo de óleo, permitiram considerar o óleo vegetal como possível competidor do óleo mineral, não só para os pequenos transformadores de distribuição, mas também para transformadores de maior potência, que normalmente operam com temperaturas mais elevadas (MARTINS, 2008).

Por ser isento de compostos de enxofre, não existem riscos de falhas de equipamentos elétricos isolados a óleo vegetal devido ao enxofre corrosivo.

2.1.2.2. COMPATIBILIDADE DO OVI COM MATERIAIS

No relatório da Doble (MCSHANE e MARTINS, 2003) é comentado que os óleos vegetais isolantes são compatíveis com a maioria dos materiais internos do transformador. Subentende-se assim, que uma minoria dos materiais não é compatível. No entanto, nenhuma referência é feita nesse

relatório ou em qualquer outro documento quanto a esta questão.

Na falta de padronização adequada para OVI, Uhren realizou testes de compatibilidade de alguns materiais internos do transformador com OVI, baseado na metodologia e nos critérios definidos na norma ABNT NBR 14275 (UHREN, 2007). De acordo com os resultados obtidos, Uhren poderia concluir que a tinta, o fio esmaltado e a borracha nitrílica testada seriam classificadas como incompatíveis com o OVI utilizado, baseado nos critérios definidos para OMI (ABNT NBR 14274). Porém, o autor comentou que, como para realização dos testes foi usada a norma para OMI, não foi possível concluir se os resultados obtidos no estudo realizado, para o OVI e misturas deste com OMI, realmente eram indicativos de incompatibilidade. Ou seja, os ensaios de compatibilidade realizados reforçaram a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o assunto e de elaboração de uma norma nacional ou internacional, específica para avaliação da compatibilidade dos materiais internos do transformador com OVI e misturas deste com OMI (UHREN, 2007). A partir do estudo realizado por Uhren foi iniciado em 2008 a presente pesquisa.

A partir do estudo realizado por Uhren, a Comissão de Estudos de Líquidos Isolantes Sintéticos e Naturais (CE-03:010.2) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (COBEI) assumiu como meta para o terceiro trimestre de 2007 a elaboração de uma norma nacional para realização deste tipo de ensaio. A submissão do projeto de norma elaborado pela comissão está prevista para o final de 2010. Os resultados deste estudo contribuíram na elaboração do projeto de norma.

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo estão descritos os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados na realização deste trabalho, abrangendo a caracterização físico-química dos fluidos isolantes puros e suas misturas (OMI e OVIs), os testes mecânicos realizados nos elastômeros utilizados neste estudo, os ensaios de compatibilidade com materiais internos de transformador e, por fim, os ensaios de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes.

3.1. FLUIDOS ISOLANTES E MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizados o óleo mineral isolante Lubrax Industrial AV60-IN, adquirido da PETROBRAS, os óleos vegetais isolantes Envirotemp[®] FR3[™] e Biovolt A[®], adquiridos da COOPER POWER SYSTEMS e MINERALTEC, respectivamente.

Os corpos de prova de papel Kraft isolante e aço silício foram gentilmente cedidos pela WEG Transformadores. Os elastômeros, borracha nitrílica e de fluorsilicone, identificados por “composto 1361” e “composto 5370”, respectivamente, foram obtidas de um fornecedor nacional. O material da bolsa

utilizado neste estudo, denominado simplesmente por “bolsa”, foi gentilmente cedido pela empresa PRONAL – fabricante de bolsas de expansão na França e fornecedor deste material para o Brasil.

Os corpos de prova de tinta foram cedidos pela empresa Marangoni. Os corpos de prova receberam uma demão de Shop Primer Epoxi para fundo com no mínimo 20 μm e uma demão de acabamento de tinta tipo Epoxi Amina com no mínimo 80 μm .

3.2. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS ISOLANTES NOVOS

Os OVIs novos, Envirotemp FR3 e Biovolt A, foram caracterizados de acordo com a norma ABNT NBR 15422 e o OMI AV60-IN conforme resolução ANP 36 de 05/12/2008. Nas Tabelas 4 e 5, estão mostrados os ensaios realizados com os respectivos resultados obtidos e valores limites aceitáveis para óleo novo, para os OVIs e para o OMI, respectivamente.

TABELA 4. Ensaios de caracterização realizados nos OVIs, de acordo com a especificação da norma ABNT NBR 15422.

Ensaio	Unidade	Método (ABNT)	Limite especificado*	Equipamento utilizado
Análise visual	-	VISUAL	Claro, límpido e isento de materiais em suspensão	-
Índice de neutralização	mg KOH.(g óleo) ⁻¹	NBR 14248	0,06 máx.	Potenciógrafo Metrohm 730 e 716 DMS Titrimo
Teor de água	ppm (m.m ⁻¹)	NBR 10710/B	200	Baur, KFM 1000
Cor	-	NBR 14483	1,0 máx.	Fisher, 13-449
Densidade a 20 °C	g.ml ⁻¹	NBR 7148	0,96 máx.	APaar, DMA 48
Fator de perdas dielétricas a 25 °C	%	NBR 12133	0,20 máx.	TETTEX AG INSTRUMENTS 2822HS
Fator de perdas dielétricas a 100 °C	%	NBR 12133	4,0 máx.	
Ponto de fulgor	°C	NBR 11341	275 mín.	Solotest, Cleveland
Ponto de combustão	°C	NBR 11341	300 mín.	Solotest, Cleveland
Rigidez dielétrica	kV	NBR 6869	30 mín.	Baur, DTA
Viscosidade a 20 °C	cSt	NBR 10441	150 máx.	Banho Precilabo Haake DL30 e Coluna Schott Geräte
Viscosidade a 40 °C	cSt	NBR 10441	50 máx.	
Viscosidade a 100 °C	cSt	NBR 10441	15 máx.	
Enxofre corrosivo	-	NBR 10505	Não corrosivo	-
Teor de PCB	mg.kg ⁻¹	NBR 13882/B	Não detectável	Finningan 9001, com detector ECD e coluna do tipo OV-5
Ponto de fluidez	°C	NBR 11349	-10 máx.	Marconi, modelo MAE 184

* Fonte: ABNT NBR 15422 (2006)

TABELA 5. Ensaios de caracterização realizados no OMI, de acordo com a resolução 36 da ANP de 05/12/2008.

Ensaio	Unidade	Método (ABNT)	Limite especificado*	Equipamento utilizado
Análise visual	-	VISUAL	Claro, límpido e isento impurezas	-
Índice de neutralização	mg KOH. ₁ (g óleo) ⁻¹	NBR 14248	0,03 máx.	Potenciógrafo Metrohm 730 e 716 DMS Titrimo
Teor de água	ppm (m.m ⁻¹)	NBR 10710/B	35 máx.	Baur, KFM 1000
Cor	-	NBR 14483	1,0 máx.	Fisher, 13-449
Densidade a 20 °C	g.ml ⁻¹	NBR 7148	0,96 máx.	APaar, DMA 48
Fator de perdas dielétricas a 25 °C	%	NBR 12133	0,05 máx.	TETTEX AG INSTRUMENTS 2822H
Fator de perdas dielétricas a 100 °C	%	NBR 12133	0,50 máx.	
Ponto de fulgor	°C	NBR 11341	140 mín.	Solotest, Cleveland
Rigidez dielétrica	kV	NBR 6869	30 mín.	Baur, DTA
Viscosidade a 40 °C	cSt	NBR 10441	12 máx.	Banho Precilabo Haake DL30 e Coluna Schott Geräte
Enxofre corrosivo	-	NBR 10505	Não corrosivo	-
Teor de PCB	mg.kg ⁻¹	NBR 13882/B	Não detectável	Finningan 9001, com detector ECD e coluna do tipo OV-5
Ponto de fluidez	°C	NBR 11349	-39 máx.	Marconi, modelo MAE 184
Teor de DBPC	%	NBR 12134 A	-	FTIR
Tensão Interfacial	mN/m	NBR 6234	40 mín.	KRÜS K10ST

* Fonte: (ANP 05.12.2008)

3.3. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DOS FLUIDOS ISOLANTES

Foram realizados ensaios de compatibilidade dos OVIs, Biovolt A e Envirotemp FR3, e do OMI AV60-IN com os seguintes materiais internos do transformador: borracha nitrílica; borracha de fluorsilicone; material da bolsa; tinta de revestimento interno; aço silício de núcleo do transformador; e papel Kraft isolante.

Os ensaios de compatibilidade foram realizados em duplicata e baseados no procedimento experimental descrito na norma ABNT NBR 14274. É importante ressaltar que esta norma é específica para ensaios de compatibilidade com OMI.

Antes de seu uso, os materiais foram secos em estufa, a 105 °C, por 16 horas segundo procedimento descrito na norma ABNT NBR 14274. Após este período, foram retirados da estufa e acondicionados em dessecador para resfriamento à temperatura ambiente. Os materiais secos foram imersos nos fluidos isolantes, em frascos de vidro âmbar com tampa esmerilhada.

Foram utilizadas as seguintes proporções entre os materiais testados e o fluido isolante:

- prova em branco (somente o óleo): 800 ml de óleo isolante;
- elastômero: 65 cm² em 800 ml de óleo;
- tinta: 1300 cm² de placas pintadas com a tinta teste em 800 ml de óleo;
- aço silício: 6200 cm² em 800 ml de óleo;

- papel Kraft: 52 cm² em 800 ml de óleo.

Em seguida, foi borbulhado gás nitrogênio (grau de pureza 4.6), durante 2 minutos com vazão de aproximadamente 1 L.min⁻¹, em cada frasco contendo OMI e o material a ser testado, conforme indicado na norma ABNT NBR 14274. Para os frascos com OVI foi borbulhado nitrogênio durante 10 minutos. Este tempo superior de borbulhamento para o OVI em relação ao OMI deve-se a maior solubilidade do gás oxigênio no OVI, e tal procedimento foi baseado no trabalho 'Avaliação da metodologia de borbulhamento do gás nitrogênio no óleo vegetal isolante (OVI)' apresentado pelo LACTEC na 2ª reunião de 2008 do Comitê Brasileiro de Eletricidade, da CE-03:10.2 – Comissão de Estudos de Líquidos Isolantes Sintéticos e Naturais. Após borbulhamento do gás nitrogênio os frascos foram fechados.

Os frascos fechados foram levados à estufa, a 100 °C, por 164 horas. Decorrido este tempo, os frascos foram retirados da estufa e condicionados à temperatura ambiente, sendo realizados os seguintes ensaios no OMI, utilizando as normativas e equipamentos descritos no item 3.2:

- tensão interfacial (ABNT NBR 6234);
- índice de neutralização (ABNT NBR 14248); e
- fator de perdas dielétricas a 90 °C (ABNT NBR 12133).

No OVI foram realizados os seguintes ensaios, utilizando as normativas e equipamentos descritos no item 3.2:

- índice de neutralização (ABNT NBR 14248);

- fator de perdas dielétricas a 90 °C (ABNT NBR 12133); e
- viscosidade cinemática a 40 °C (ABNT NBR 10441).

3.4. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS ELASTÔMEROS

Foram realizados ensaios de identificação e de dureza shore A nas 3 amostras de elastômeros (borracha nitrílica, borracha fluorsilicone e bolsa).

Os ensaios de identificação foram realizados por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), com equipamento da marca BOMEM (modelo MB100), com resolução de 4 cm⁻¹, de acordo com a norma ASTM D3677. As medidas de dureza foram realizadas à temperatura ambiente, com auxílio do Durômetro, marca Bareiss modelo HPE - A, conforme norma ASTM D2240, utilizando carga de 1 kgf. A leitura do medidor do durômetro foi realizada 5 segundos após a estabilização do indicador do aparelho.

As borrachas nitrílica e de fluorsilicone foram submetidas a ensaios mecânicos. Inicialmente, foram feitos ensaios mecânicos nas amostras das borrachas novas para avaliar suas propriedades originais. Em seguida, amostras das mesmas borrachas analisadas foram envelhecidas em estufa, a 125 °C, durante 70 horas de acordo com a norma ABNT NBR 6565. Tais ensaios estão apresentados na Tabela 6, bem como os valores de especificação e os equipamentos utilizados.

TABELA 6. Ensaios de caracterização aplicados aos elastômeros.

Propriedade/Característica		Método	Valores de especificação	Equipamentos utilizados
Material	Identificação	ASTM D3677	anotar	FTIR
Propriedades originais	Dureza shore A	ABNT NBR 7318	65 ± 5	Durômetro Bareiss modelo HPE – A
Nitrílica	Tensão de ruptura (mín.)	ABNT NBR 7462	mín. 10 MPa	Máquina de tração universal
	Alongamento (mín.) %	ABNT NBR 7462	mín. 300%	
Fluorsilicone	Tensão de ruptura (mín.)	ABNT NBR 7462	mín. 2,5 MPa	
	Alongamento (mín.) %	ABNT NBR 7462	mín. 150%	
Envelhecimento térmico após 70h a 125 °C – ABNT NBR 6565	Variação de dureza Shore A	ABNT NBR 7318	0 a +15 pts	Durômetro Bareiss modelo HPE – A
	Variação de tensão	ABNT NBR 7462	- 25%	Máquina de tração universal
	Variação de alongamento	ABNT NBR 7462	- 50%	
	Fissuras	visual	ausente	
	Afloramento	visual	ausente	-

Também foram realizados ensaios de avaliação da resistência química a óleos isolantes para fins comparativos com os resultados dos ensaios de compatibilidade. Desse modo, as amostras das borrachas nitrílica e de fluorsilicone foram imersas nos óleos vegetais (Biovolt A e Envirotemp FR3) e no OMI (AV60-IN) e colocadas em estufa durante 70 horas, a 125 °C para envelhecimento de acordo com o procedimento descrito na norma ABNT NBR 11407 (procedimento específico para OMI). Após este período as amostras

foram retiradas da estufa e submetidas aos ensaios mecânicos que estão apresentados na Tabela 7, assim como os valores de especificação e os equipamentos utilizados.

TABELA 7. Ensaio de resistência química dos elastômeros com os óleos.

Envelhecimento em óleo isolante após 70 h a 125 °C – ABNT NBR 11407				
Propriedade/Característica		Método	Valores de especificação	Equipamentos utilizados
Composto 1361 Nitrílica	Variação de dureza Shore A	ABNT NBR 7318	± 10 pts	Durômetro Bareiss modelo HPE – A
	Variação de volume	ABNT NBR 11407	0 a + 15 %	-
	Variação de tensão	ABNT NBR 7462	- 15 %	Máquina de tração universal
	Variação de alongamento	ABNT NBR 7462	- 30 %	
	Fissuras	visual	ausente	-
Composto 5370 Fluorsilicone	Variação de dureza Shore A	ABNT NBR 7318	± 10 pts	Durômetro Bareiss modelo HPE – A
	Variação de volume	ABNT NBR 11407	0 a + 15 %	-
	Variação de tensão	ABNT NBR 7462	- 15 %	Máquina de tração universal
	Variação de alongamento	ABNT NBR 7462	- 30 %	
	Fissuras	visual	ausente	-

3.5. OBTENÇÃO DE MISTURAS OMI/OVIs E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MESMAS

Foram preparadas misturas OMI/Envirotemp FR3 e OMI/Biovolt A, nas proporções de 4, 7 e 10% de OMI em OVI, a partir do método gravimétrico pela pesagem dos componentes individuais nas proporções desejadas, utilizando-se uma Balança Eletrônica (modelo GT4100, OHAUS). Após pesagem, os componentes foram misturados e realizados os seguintes ensaios nas misturas, utilizando as normativas e equipamentos descritos na Tabela 4 do item 3.2: índice de neutralização; teor de água; densidade a 20 °C; fator de perdas dielétricas a 90 °C; tensão interfacial; ponto de fulgor; ponto de combustão; rigidez dielétrica; e viscosidade a 40 °C.

3.6. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DAS MISTURAS OMI/OVI COM ELASTÔMEROS

O procedimento dos ensaios de compatibilidade das amostras dos elastômeros (borracha nitrílica, fluorsilicone e material da bolsa) com as misturas OMI/Envirotemp FR3 e OMI/Biovolt A, na proporção de 4, 7 e 10%, e a relação de material/óleo utilizados foram os mesmos descritos no item 3.3 (ensaios de compatibilidade com os óleos isolantes puros).

Nas misturas dos fluidos isolantes foram realizados ensaios de fator de perdas dielétricas a 90 °C, índice de neutralização e viscosidade cinemática a 40 °C, antes e após os testes de compatibilidade.

3.7. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS FLUIDOS ISOLANTES NA AUSÊNCIA E PRESENÇA DE MATERIAIS

Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado dos OVIs (Envirotemp FR3 e Biovolt A) e do OMI (AV60-IN) na ausência e presença dos seguintes materiais: papel Kraft isolante, aço silício de núcleo do transformador, bolsa, borracha nitrílica, e borracha de fluorsilicone.

Para os ensaios de envelhecimento, foi adotado o mesmo procedimento utilizado nos ensaios de compatibilidade, descrito no item 3.3. Porém, o ensaio foi estendido de 164 h para 716 horas. Em intervalos regulares de tempo (72, 164, 236, 308, 380 e 716 horas) foram retirados frascos contendo as amostras em estudo (óleos isolantes com e sem o material em teste) para realização de ensaios físico-químicos.

Nas amostras dos OVIs envelhecidos foram realizados os ensaios de índice de neutralização, viscosidade cinemática a 40 °C e fator de perdas dielétricas a 90 °C. No OMI foram realizados os ensaios de índice de neutralização, tensão interfacial e fator de perdas dielétricas a 90 °C. Ambos os

ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos descritos no item 3.2.

3.8. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE COMPATIBILIDADE OBTIDOS NESTE ESTUDO

Os resultados obtidos nos ensaios realizados nos óleos (parâmetros analisados: acidez, viscosidade, fator de perdas dielétricas e tensão interfacial), contendo a amostra de material teste, foram comparados com aqueles obtidos para a prova em branco, para determinar a variação (diferença) nos valores obtidos. Por exemplo, a diferença entre o valor do índice de neutralização (parâmetro analisado) do óleo contendo papel Kraft (material teste) e o valor do índice de neutralização da prova em branco foi reportado neste trabalho como a variação do índice de neutralização para esse experimento.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS ISOLANTES NOVOS

As propriedades determinadas para os OVIs novos (Tabela 8) estão em conformidade com a especificação contida na norma ABNT NBR 15422 e os resultados obtidos para o OMI novo (Tabela 9) atendem a resolução ANP 36 de 05.12.2008. No entanto, é necessário fazer algumas considerações.

Comparados ao OMI, os OVIs apresentaram maior ponto de combustão, em torno de 340 °C, razão pela qual são considerados fluidos de segurança; viscosidade aproximadamente 4 vezes maior, propriedade que pode afetar o processo de impregnação do papel isolante e de refrigeração do equipamento; e teor de água superior. Fluidos de origem vegetal permitem um maior teor de água dissolvida em virtude de sua maior polaridade em relação ao OMI. O índice de neutralização dos OVIs novos se mostrou superior ao do OMI novo. Isso indica que os OVIs analisados possuem mais compostos de caráter ácido. É importante salientar que dentre os fluidos analisados, o Envirotemp FR3 foi o isolante que apresentou maior acidez, pressupondo diferenças no processo de produção e/ou na matéria prima do óleo base utilizado pelo fornecedor.

A medida das perdas dielétricas em um fluido isolante está relacionada com a quantidade de energia dissipada pelo material na forma de calor. Os OVIs novos têm, geralmente, perdas dielétricas mais altas do que o OMI, especialmente em temperaturas mais elevadas.

A rigidez dielétrica do OMI foi da mesma magnitude que dos OVIs.

O ponto de fluidez é a medida de tendência à “solidificação” do óleo em função do abaixamento da temperatura. O ponto de fluidez do OMI foi bem mais baixo que o dos OVIs, indicando que este óleo flui e pode ser armazenado em temperaturas bem mais baixas.

Os óleos vegetais são isentos de compostos de enxofre corrosivo.

TABELA 8. Caracterização físico-química dos OVIs novos.

Ensaio	Unidade	Envirotemp FR3	Biovolt A	Valor especificado*
Análise visual	-	Claro e límpido	Claro e límpido	Claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Índice de neutralização	mg KOH.(g óleo) ⁻¹	0,06	0,01	0,06 máx.
Teor de água	ppm (m.m ⁻¹)	37	55	200
Cor	-	L 0,5	L 1,0	1,0 máx.
Densidade a 20 °C	g.ml ⁻¹	0,9199	0,9182	0,96 máx.
Fator de perdas dielétricas a 25 °C	%	0,25	0,03	0,20 máx.
Fator de perdas dielétricas a 100 °C	%	1,5	0,70	4,0 máx.
Ponto de fulgor	°C	312	310	275 mín.
Ponto de combustão	°C	346	340	300 mín.
Rigidez dielétrica	kV	47	49	30 mín.
Viscosidade a 20 °C	cSt	75,00	66,46	150 máx.
Viscosidade a 40 °C	cSt	35,76	31,53	50 máx.
Viscosidade a 100 °C	cSt	8,40	7,66	15 máx.
Enxofre corrosivo	-	Não corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo
Teor de PCB	mg.kg ⁻¹	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Ponto de fluidez	°C	-21	-12	-10 máx.

* Fonte: ABNT NBR 15422 (2006)

TABELA 9. Caracterização físico-química do OMI novo.

Ensaio	Unidade	AV-60 IN	Valor especificado*
Análise visual	-	Claro e límpido	Claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Índice de neutralização	mg KOH.(g óleo) ⁻¹	0,01	0,03 máx.
Teor de água	ppm (m.m ⁻¹)	17	35 máx.
Cor	-	0,0	1,0 máx.
Densidade a 20 °C	g.ml ⁻¹	0,8882	0,96 máx.
Fator de perdas dielétricas a 25 °C	%	0,004	0,05 máx.
Fator de perdas dielétricas a 100 °C	%	0,11	0,50 máx.
Ponto de fulgor	°C	140	140 mín.
Rigidez dielétrica	kV	47	30 mín.
Viscosidade a 40 °C	cSt	9,97	12 máx.
Enxofre corrosivo	-	Não corrosivo	Não corrosivo
Teor de PCB	mg.kg ⁻¹	Não detectado	Não detectado
Ponto de fluidez	°C	<-50	-39 máx.
Tensão interfacial	mN.m ⁻¹	49,5	40 mín.

* Fonte: (ANP 05.12.2008)

4.2. ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DOS FLUIDOS ISOLANTES COM OS MATERIAIS

Nas Figuras 4-7, estão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de compatibilidade dos fluidos isolantes novos com os materiais aço silício, papel Kraft, tinta e borrachas (nitrílica, fluorsilicone e bolsa), respectivamente.

Analisando o índice de neutralização das amostras (Figura 4-A), foi possível verificar que o Envirotemp FR3 apresentou, na presença de todos os materiais testados, maior acidez em comparação ao OMI e o Biovolt A.

Considerando unicamente o valor limite da variação do índice de neutralização descrito na norma ABNT NBR 14274, específica para ensaios de compatibilidade com OMI, que corresponde a um aumento de 0,02 mg KOH.(g óleo⁻¹), todos os materiais podem ser considerados compatíveis com os óleos testados nesse trabalho (Figura 4-B).

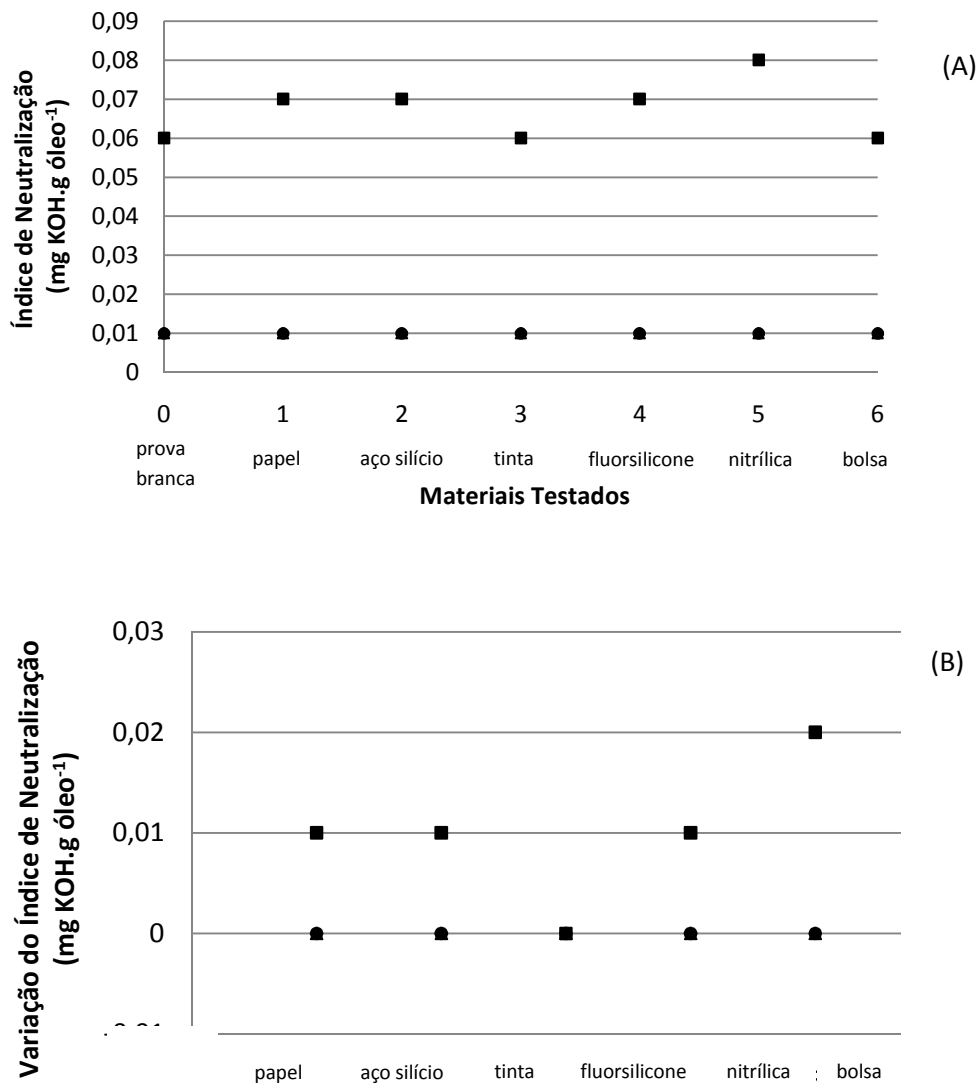


FIGURA 5. (A) Efeito dos diferentes materiais testados sobre o índice de neutralização dos óleos isolantes: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e a prova em branco.

O fator de perdas dielétricas a 90 °C (Figura 5-A) para os 3 tipos de óleo utilizados em relação as provas brancas, variou na presença das borrachas de fluorsilicone na seguinte ordem: OMI > Envirotemp FR3 > Biovolt A.

Considerando o valor limite da variação para o fator de perdas dielétricas a 90 °C, descrito na norma ABNT NBR 14274 (aumento máximo de 0,50%), apenas a borracha de fluorsilicone pode ser considerada incompatível com o OMI (Figura 5-B). Considerando esse mesmo valor limite para os OVIs analisados, o papel Kraft, o aço silício e o material da bolsa podem ser considerados compatíveis com o Biovolt A. Todos os demais materiais podem ser considerados incompatíveis com os óleos analisados. Os valores encontrados para os materiais classificados como incompatíveis com os OVIs indicam duas condições: 1) os materiais de fato afetam o fator de perdas dielétricas a 90 °C dos OVIs; 2) os valores limites considerados na classificação dos materiais como incompatíveis (ABNT NBR 14274), específicos para OMI, não se aplicam aos OVIs, devendo portanto, ser revisados e propostos novos valores para os fluidos vegetais.

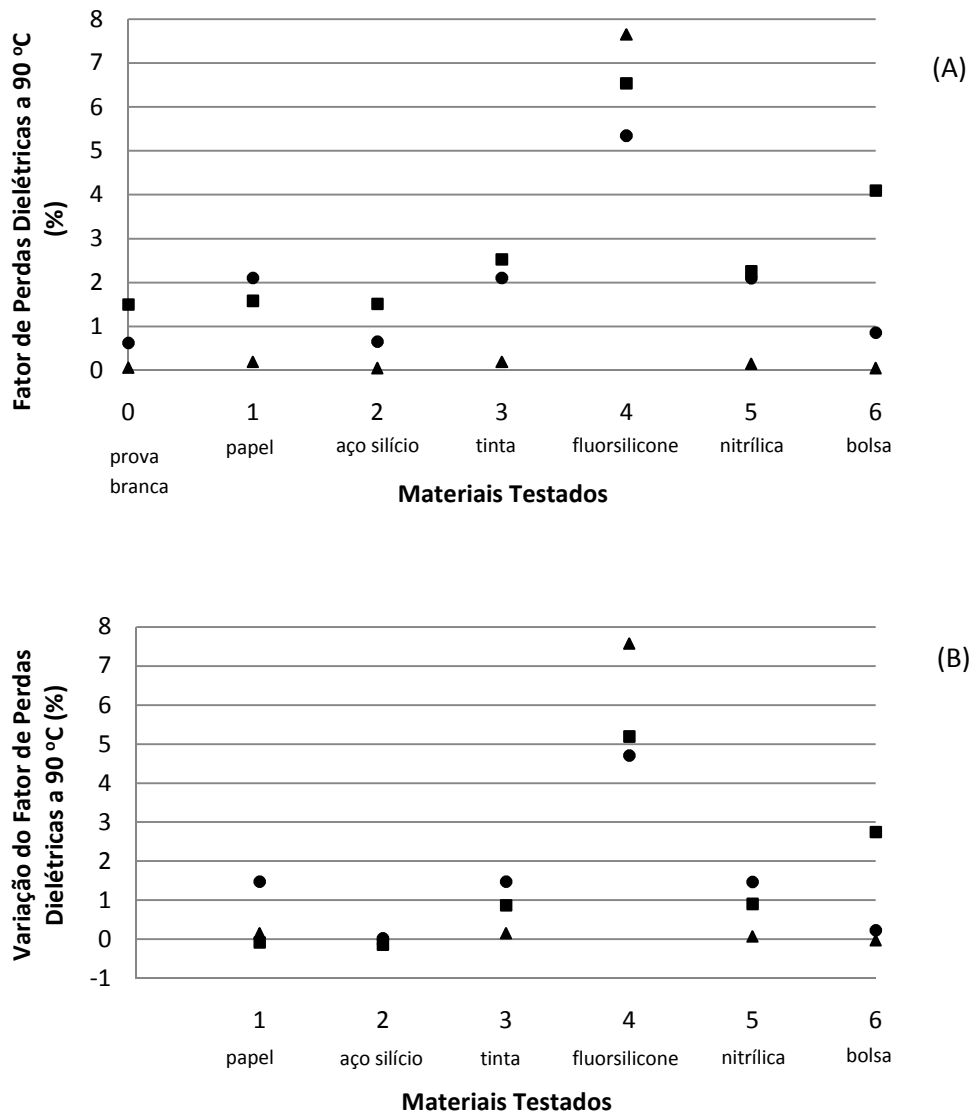


FIGURA 6. (A) Efeito dos diferentes materiais testados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C dos óleos isolantes: (■) Envirotemp FR3, (●) Biovolt A e (▲) OMI. (B) Diferença entre o fator de perdas dielétricas das amostras e a prova em branco.

A Figura 6-A apresenta os resultados obtidos para a viscosidade cinemática a 40 °C para as amostras dos OVI's na presença dos diferentes materiais. É possível notar que a viscosidade do Envirotemp FR3 é superior em comparação a do Biovolt A, conforme apresentado anteriormente na Tabela 8.

A norma ABNT NBR 14274 não apresenta valor limite para a viscosidade, ou seja, a viscosidade não é parâmetro indicador de compatibilidade nos ensaios com OMI. Porém, como Tulio recomendou este parâmetro como indicador da degradação do OVI em uso, esta propriedade foi monitorada nos OVIs ensaiados neste estudo (TULIO, 2008).

Observando os resultados obtidos neste trabalho, percebe-se que não houve variação significativa na viscosidade dos diferentes ensaios de compatibilidade realizados. As pequenas variações observadas, tanto na Figura 6-A quanto na Figura 6-B, estão dentro do erro de repetibilidade do método utilizado (ABNT NBR 10441), que corresponde a 0,35% do valor médio obtido. Esses resultados mostram que nenhum dos materiais afetou a viscosidade dos OVIs, indicando duas possibilidades: 1) todos os materiais são compatíveis com os OVIs analisados; 2) a medição da viscosidade do OVI pode não ser um parâmetro adequado quando se pretende avaliar a compatibilidade de um material em relação a outro.

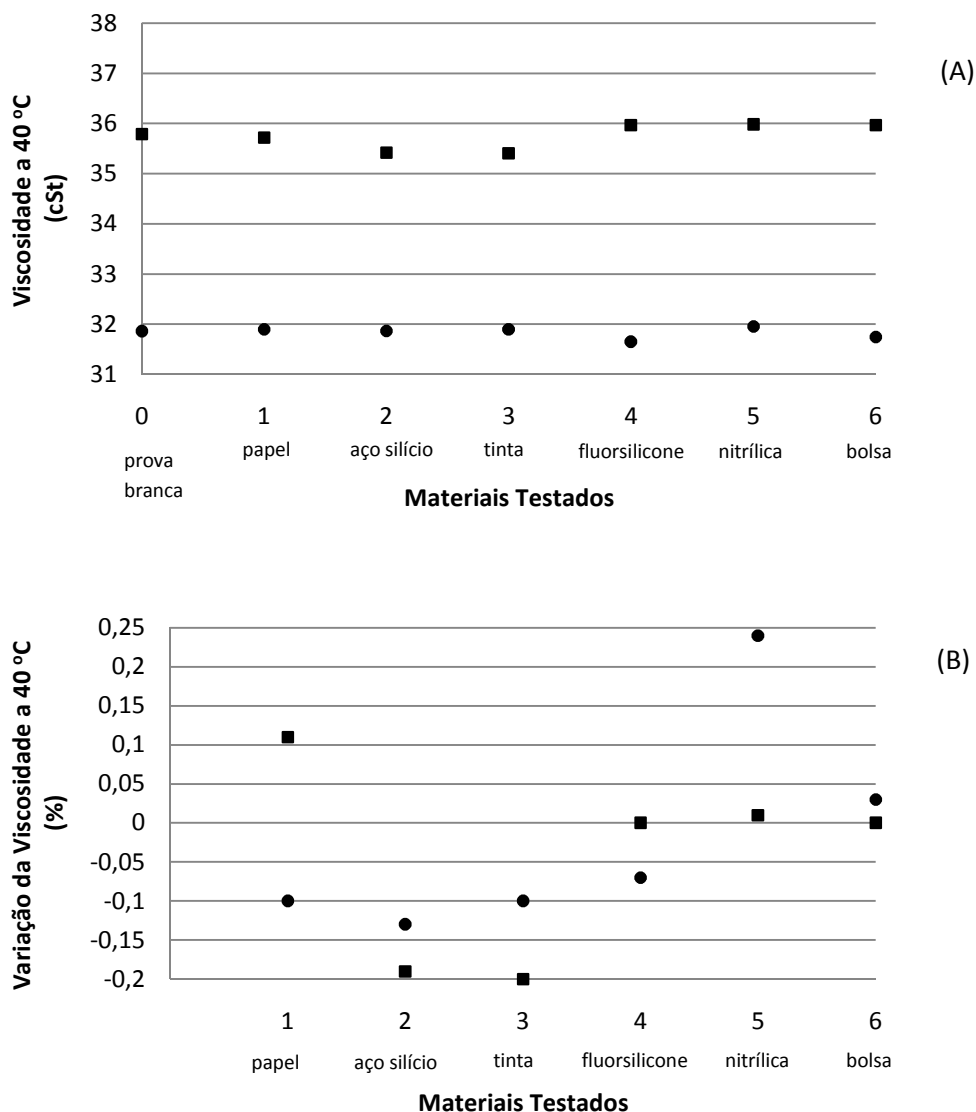


FIGURA 7. (A) Efeito dos diferentes materiais testados sobre a viscosidade a 40 °C dos óleos isolantes: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e a prova em branco.

Dentre os seis materiais testados, quatro afetaram a tensão interfacial do OMI sendo estes a tinta, a bolsa, a borracha nitrílica e a borracha fluorsilicone (Figura 7-A). Considerando a variação máxima apresentada na norma ABNT NBR 14274 (diminuição de 5 mN/m), todos esses materiais podem ser considerados incompatíveis com OMI (Figura 7-B). Pelo ensaio de

acompanhamento do fator de perdas dielétricas do OMI (Figura 5B), apenas a borracha de fluorsilicone havia sido considerada incompatível com este fluido. Porém, para o material ser considerado incompatível com o fluido sob investigação o não atendimento a variação máxima de apenas um dos parâmetros medidos, definidos na norma ABNT NBR 14274, é suficiente. Dessa forma, dentre os materiais analisados neste trabalho apenas o papel Kraft e o aço silício são compatíveis com o OMI.

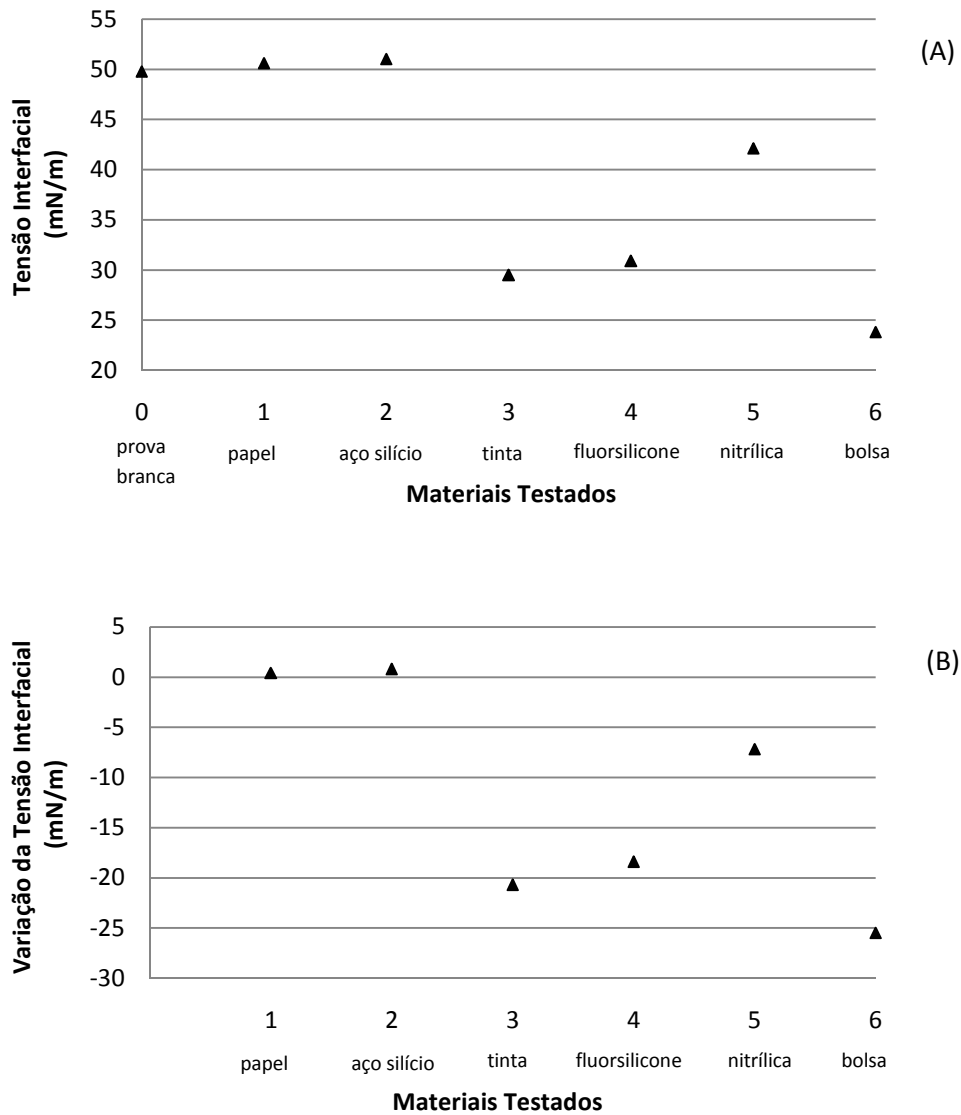


FIGURA 8. (A) Efeito dos materiais testados sobre a tensão interfacial do (▲) OMI. (B) Diferença entre a tensão interfacial das amostras e a prova em branco.

4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS ELASTÔMEROS

Os ensaios de identificação e de dureza shore A nas amostras das borrachas (nitrílica, fluorsilicone e bolsa) estão apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente. Os ensaios de identificação confirmaram os tipos de borrachas fornecidos pelos fabricantes. A bolsa se apresentou como uma mistura de borracha nitrílica e de borracha a base de flúor (Tabela 10).

Os resultados da Tabela 11 mostraram que, os elastômeros utilizados neste estudo atenderam à especificação da norma ASTM D2240, que define o valor limite de 65 ± 5 para o ensaio de dureza Shore A.

TABELA 10. Resultados de identificação das borrachas.

Amostra	FTIR	Norma
Nitrílica	Borracha nitrílica	ASTM D 3677-90
Fluorsilicone	Borracha de fluorsilicone	ASTM D 3677-90
Bolsa	Borracha nitrílica e elastômero a base de flúor	ASTM D 3677-90

TABELA 11. Resultados de Dureza shore A.

Amostra	Dureza shore A*	Especificação	Norma
Nitrílica	68 ± 1	65 ± 5	ASTM D 2240-95
Fluorsilicone	72 ± 1	65 ± 5	ASTM D 2240-95
Bolsa	82 ± 1	65 ± 5	ASTM D 2240-95

* Os resultados apresentados se referem à média aritmética de 10 leituras na mesma amostra.

A borracha nitrílica apresentou valores inferiores à especificação para as propriedades originais de tensão de ruptura e de alongamento, que correspondem a 9,4 MPa e 243%, respectivamente. Enquanto que a borracha fluorsilicone atendeu às especificações da norma ABNT NBR 7462, apresentando valores de 8,2 MPa para tensão de ruptura e 281% para o alongamento (Tabela 12). Esses resultados indicam que o composto 1361 (borracha nitrílica) está fora dos padrões de qualidade que devem ser atendidos para as propriedades mecânicas (alongamento e tensão de ruptura) de elastômeros novos, baseado na norma ABNT NBR 7462.

Após o ensaio de envelhecimento térmico (Tabela 12) nenhuma das duas borrachas atendeu na íntegra os valores limites estipulados.

TABELA 12. Ensaio de caracterização dos elastômeros antes e após o teste de envelhecimento térmico.

Propriedade/Característica		Valores de especificação	Composto 1361	Composto 5370
Material	Identificação (ASTM D3677)	anotar	Nitrílica	Fluorsilicone
Propriedades originais	Dureza shore A (ABNT NBR 7318)	65 ± 5	68	72
Nitrílica	Tensão de ruptura (mín.) (ABNT NBR 7462)	mín 10 MPa	9,4	-
	Alongamento (mín.) % (ABNT NBR 7462)	mín 300%	243	-
Fluorsilicone	Tensão de ruptura (mín.) (ABNT NBR 7462)	mín 2,5 MPa	-	8,2
	Alongamento (mín.) % (ABNT NBR 7462)	mín 150%	-	281

TABELA 12. CONTINUAÇÃO. Ensaio de caracterização dos elastômeros antes e após o teste de envelhecimento térmico.

Propriedade/Característica	Valores de especificação	Composto 1361	Composto 5370	
Propriedades após envelhecimento térmico por 70h a 125 °C	Varição de dureza Shore A (ABNT NBR 7318)	0 a + 15 pts	+ 10	- 7
	Varição de tensão (ABNT NBR 7462)	- 25%	3,9	7,9
	Varição de alongamento (ABNT NBR 7462)	- 50%	55	263
	Fissuras	ausente	Ausente	Ausente
	Afloramento	ausente	Ausente	Ausente

Os resultados dos ensaios de avaliação de resistência química dos elastômeros aos óleos Biovolt A, Envirotemp FR3 e OMI, são mostrados na Tabela 13.

De acordo com os resultados, após os testes de resistência química com os diferentes óleos, as borrachas apresentaram variações de dureza e de volume dentro dos valores de especificação. No entanto, a variação de alongamento e de variação de tensão de ruptura, para as duas borrachas em todos os óleos testados, apresentou valores distintos dos especificados. Por conta disto, considerando os valores especificados para OMI, ambas as borrachas analisadas podem ser classificadas como inadequadas para uso em transformadores isolados com este fluido. No caso dos OVIs, os resultados

mostraram que, ou as borrachas são de fato inapropriadas para uso com OVIs, ou novos valores devem ser especificados para este tipo de fluido.

Como, após os ensaios de resistência química com óleo mineral isolante, as borrachas atenderam ao requisito de variação de volume e de dureza resta questionar se os procedimentos de realização dos ensaios de tensão e de alongamento descritos nas normas e/ou os valores limites especificados para o óleo mineral isolante não devem ser revistos, uma vez que os elastômeros não atenderam aos valores especificados para essas propriedades. Por outro lado, sugere-se a realização de um trabalho em conjunto com o fabricante de elastômeros no sentido de adequar seus processos de produção e suas matérias primas para que os produtos fabricados atendam aos valores limites estipulados nas normas para os ensaios mecânicos, nos corpos de prova após os ensaios de resistência química com óleo mineral isolante.

TABELA 13. Ensaios de resistência química dos elastômeros aos óleos vegetais e mineral isolantes.

Propriedade/Característica		Especificação para OMI	OMI	Biovolt A	Envirotemp FR3
Composto 1361 Nitrílica	Varição de dureza Shore A (ABNT NBR 7318)	± 10 pts	- 4	- 1	- 1
	Varição de volume (ABNT NBR 11407)	0 a + 15%	7,7	1,2	6,7
	Varição de tensão (ABNT NBR 7462)	- 15%	- 25	- 32	- 50
	Varição de alongamento (ABNT NBR 7462)	- 30%	- 43	- 40	- 48
	Fissuras	ausente	ausente	Ausente	Ausente
Composto 5370 Fluorsilicone	Varição de dureza Shore A (ABNT NBR 7318)	± 10 pts	+ 3	+ 1	+ 1
	Varição de volume (ABNT NBR 11407)	0 a + 15%	1,1	1,1	1,6
	Varição de tensão (ABNT NBR 7462)	- 15%	+ 30	- 7	- 11
	Varição de alongamento (ABNT NBR 7462)	- 30%	- 4	- 13	- 10
	Fissuras	ausente	ausente	Ausente	Ausente

4.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS MISTURAS OMI/OVI

A caracterização das misturas de óleos minerais e vegetais isolantes é importante para obter informações sobre o nível de contaminação de um fluido com o outro. Em caso de troca (substituição) do óleo isolante de um transformador por outro fluido, por exemplo, podem permanecer no equipamento resquícios do fluido antigo. Essas contaminações podem afetar as propriedades e o monitoramento das características do fluido isolante contido no transformador.

Os resultados apresentados nas Tabelas 14 e 15 correspondem aos ensaios físico-químicos obtidos para caracterização das misturas OMI/Envirotemp FR3 e OMI/Biovolt A, respectivamente.

De acordo com os resultados obtidos, não houve variação significativa no índice de neutralização, na rigidez dielétrica e na tensão interfacial com a adição de OMI aos OVIs (Tabelas 14 e 15).

Por outro lado, os resultados mostraram que a adição de OMI ao OVI reduz significativamente os pontos de fulgor e de combustão das misturas em relação ao OVI puro, o que pode comprometer a propriedade de fluido de segurança do OVI (Tabelas 14 e 15). Para ser considerado fluido de segurança, os OVIs devem apresentar ponto de combustão superior a 300 °C e podem assumir teores de OMI inferiores ou iguais a 7% (UHREN, 2007).

A viscosidade dos OVIs é consideravelmente maior que a do OMI (Tabelas 14 e 15). Os resultados obtidos para as misturas OMI e OVIs mostraram que a viscosidade diminui proporcionalmente à quantidade de OMI adicionada ao OVI.

De uma forma geral, o tipo de OVI adicionado ao OMI (Envirotemp FR3 ou Biovolt A) não teve nenhum efeito sobre as propriedades das misturas obtidas.

TABELA 14. Caracterização físico-química de misturas OMI/OVI (Envirotemp FR3).

Ensaio	Quantidade de OMI adicionada ao Envirotemp FR3			
	0%	4%	7%	10%
Índice de neutralização (mg KOH.g óleo ⁻¹)	0,06	0,06	0,06	0,05
Teor de água (ppm m/m)	37	46	46	51
Densidade a 20 °C (g.ml ⁻¹)	0,9199	0,9182	0,9177	0,9167
Fator de perdas dielétricas a 90 °C (%)	1,5	2,20	1,67	2,07
Tensão Interfacial (mN/m)	-	21,0	21,8	22,3
Ponto de fulgor (°C)	312	200	192	186
Ponto de combustão (°C)	346	340	240	226
Rigidez dielétrica (kV)	47	53	51	50
Viscosidade a 40 °C (cSt)	35,76	33,12	31,99	30,83

TABELA 15. Caracterização físico-química de misturas OMI/OVI (Biovolt A).

Ensaio	Quantidade de OMI adicionada ao Biovolt A			
	0%	4%	7%	10%
Índice de neutralização (mg KOH.g óleo ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,01
Teor de água (ppm m.m ⁻¹)	55	107	103	116
Densidade a 20 °C (g.ml ⁻¹)	0,9182	0,9179	0,9171	0,9161
Fator de perdas dielétricas a 90 °C (%)	0,70	0,27	0,27	0,28
Tensão Interfacial (mN/m)	-	30,0	30,6	30,3
Ponto de fulgor (°C)	310	204	198	186
Ponto de combustão (°C)	340	338	234	220
Rigidez dielétrica (kV)	49	50	52	51
Viscosidade a 40 °C (cSt)	31,53	30,22	29,25	28,05

4.5. ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DAS MISTURAS OMI/OVI COM ELASTÔMEROS

As Figuras 8-16 ilustram os resultados obtidos para os ensaios de compatibilidade das misturas OMI/OVI com as borrachas nitrílica (item 4.5.1), fluorsilicone (item 4.5.2) e bolsa (item 4.5.3).

4.5.1. ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DE MISTURAS OMI/OVI COM BORRACHA NITRÍLICA

Houve pequena variação do índice de neutralização nas misturas com Envirotemp FR3 em relação à prova em branco, o que não foi observado para as misturas com Biovolt A (Figura 8-A). No entanto, considerando a variação do índice de neutralização exigida pela norma ABNT NBR 14274 (aumento de $0,02 \text{ mg KOH.g óleo}^{-1}$), pode-se considerar que a borracha nitrílica é compatível com todas as misturas analisadas (Figura 8-B).

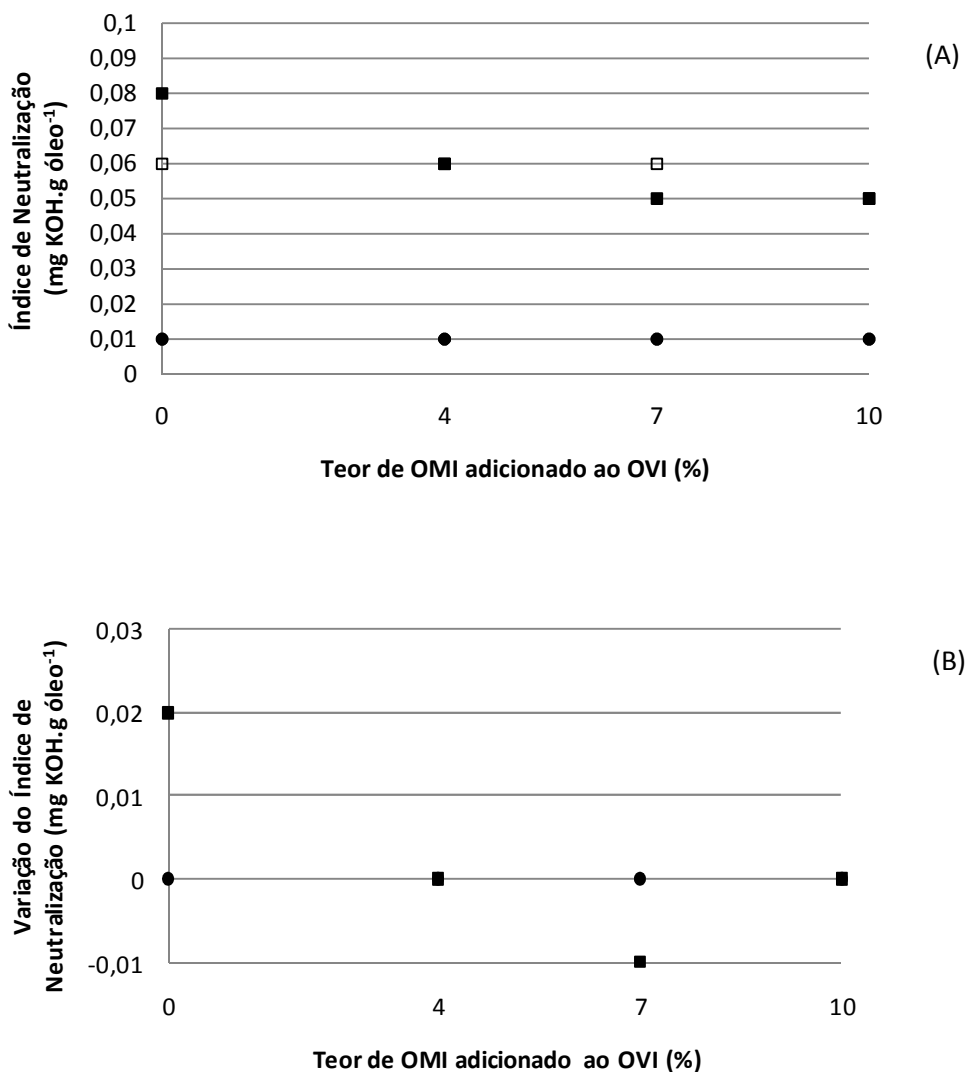


FIGURA 9. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o índice de neutralização, na presença de borracha nitrílica: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha nitrílica (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e as provas brancas.

Com o aumento do teor de OMI adicionado aos OVIs houve diminuição da viscosidade como mostra a Figura 9-A. Isso se deve ao fato do OMI ser até 4 vezes menos viscoso que os OVIs, causando uma variação substancial nos

resultados. A presença da borracha nitrílica não afetou esta condição (Figura 9-A).

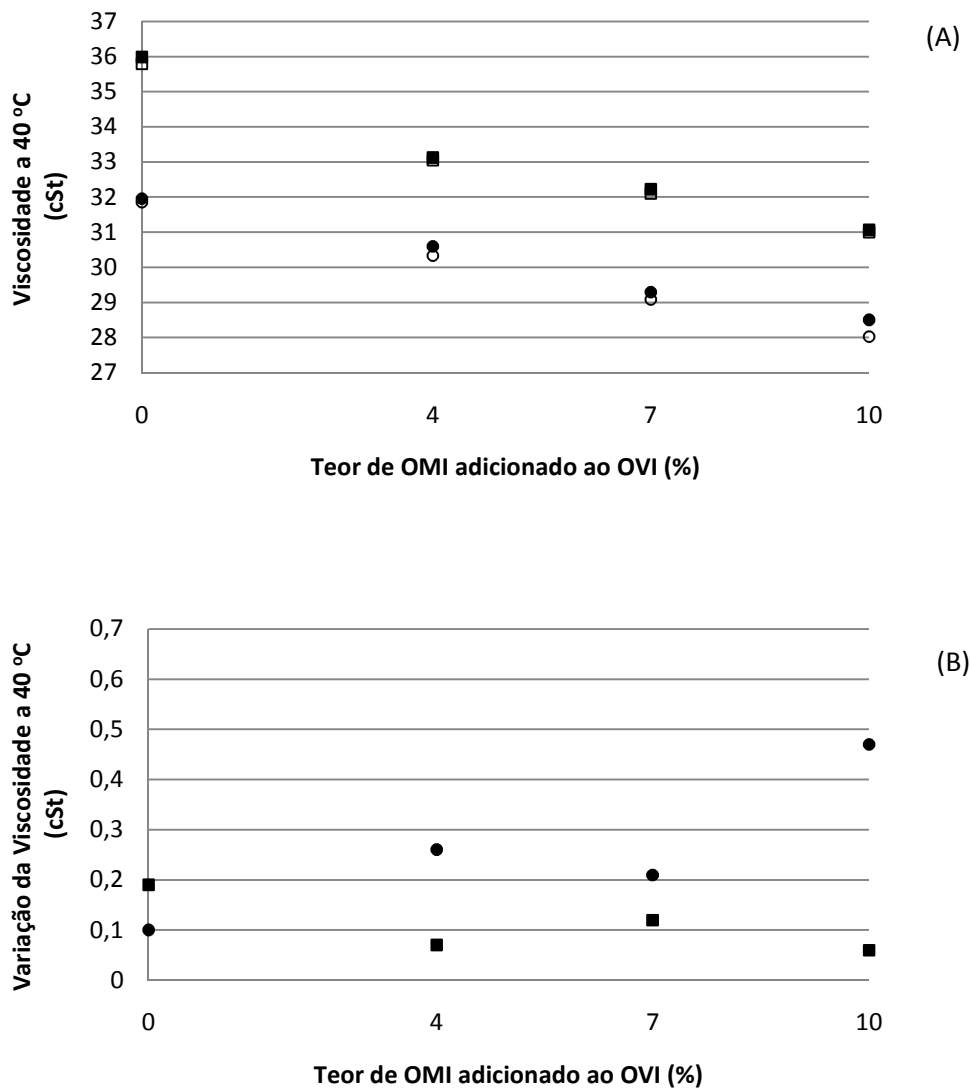


FIGURA 10. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre a viscosidade a 40 °C, na presença de borracha nitrílica: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha nitrílica (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e as provas brancas.

Os valores de viscosidade mais altos nas misturas com Envirotemp FR3, são justificados pela viscosidade desse óleo ser maior que a do Biovolt A. As variações observadas em relação à prova em branco (Figura 9-B) estão dentro do erro experimental do método de medição da viscosidade, com exceção da mistura 10% de OMI em Biovolt A que apresentou variação superior. O valor apresentado pela mistura de 10% evidencia que: 1) a borracha nitrílica afetou a viscosidade da mistura devido sua incompatibilidade com OMI, conforme apresentado na Figura 7-B (item 4.2.); 2) houve entrada de oxigênio no frasco durante a realização do ensaio de compatibilidade, uma vez que a viscosidade de OVIs aumenta na presença de oxigênio (TULIO, 2008).

Quanto ao fator de perdas dielétricas (Figura 10), a variação observada em relação à prova em branco foi de 1,5% para o BIOVOLT A e de 0,75% para o ENVIROTEMP FR3. Essa diferença diminuiu para as diferentes misturas analisadas. Estes resultados mostram que contaminações dos OVIs com OMI podem afetar o resultado para o fator de perdas dielétricas do óleo após o ensaio de compatibilidade e conseqüentemente, inferir no diagnóstico de compatibilidade. Assim, antes de realizar ensaios de compatibilidade com OVIs, o analista deve verificar se o óleo sob investigação não está contaminado com OMI.

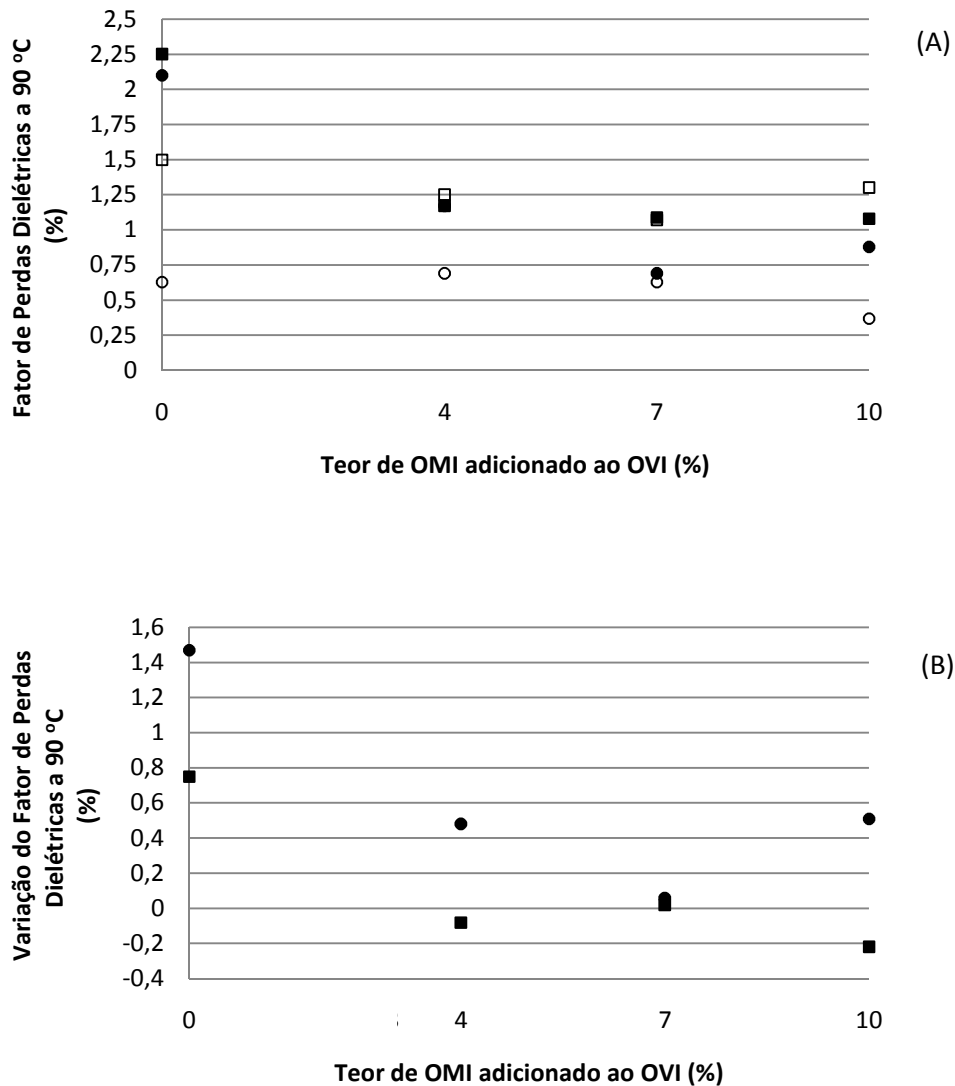


FIGURA 11. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C, na presença de borracha nitrílica: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha nitrílica (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o fator de perdas das amostras e as provas brancas.

4.5.2. ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DE MISTURAS OMI/OVI COM BORRACHA DE FLUORSILICONE

O índice de neutralização das misturas OMI/Envirotemp FR3 se mostrou maior que o das misturas OMI/Biovolt A, na ausência e presença de borracha fluorsilicone (Figura 11-A). Essa condição é justificada pelos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos óleos isolantes puros (Tabelas 4 e 5). O aumento da concentração de OMI nos OVIs não afetou significativamente a acidez das misturas na ausência e na presença da borracha fluorsilicone (Figura 11-B), sendo a variação máxima registrada igual a $0,01 \text{ mg KOH} \cdot (\text{g óleo})^{-1}$.

A viscosidade diminuiu com a adição do OMI na ausência do material (Figura 12-A). As variações observadas em relação a prova em branco (Figura 12-B) estão dentro do erro experimental do método de medição da viscosidade, com exceção da mistura 10% de OMI em Envirotemp FR3 que apresentou variação superior. O valor apresentado pela mistura de 10% evidencia que: 1) a borracha fluorsilicone afetou a viscosidade da mistura devido sua incompatibilidade com OMI, conforme apresentado na Figura 7-B (item 4.2.); houve entrada de oxigênio no frasco durante a realização do ensaio de compatibilidade, uma vez que a viscosidade de OVIs aumenta na presença de oxigênio (TULIO, 2008).

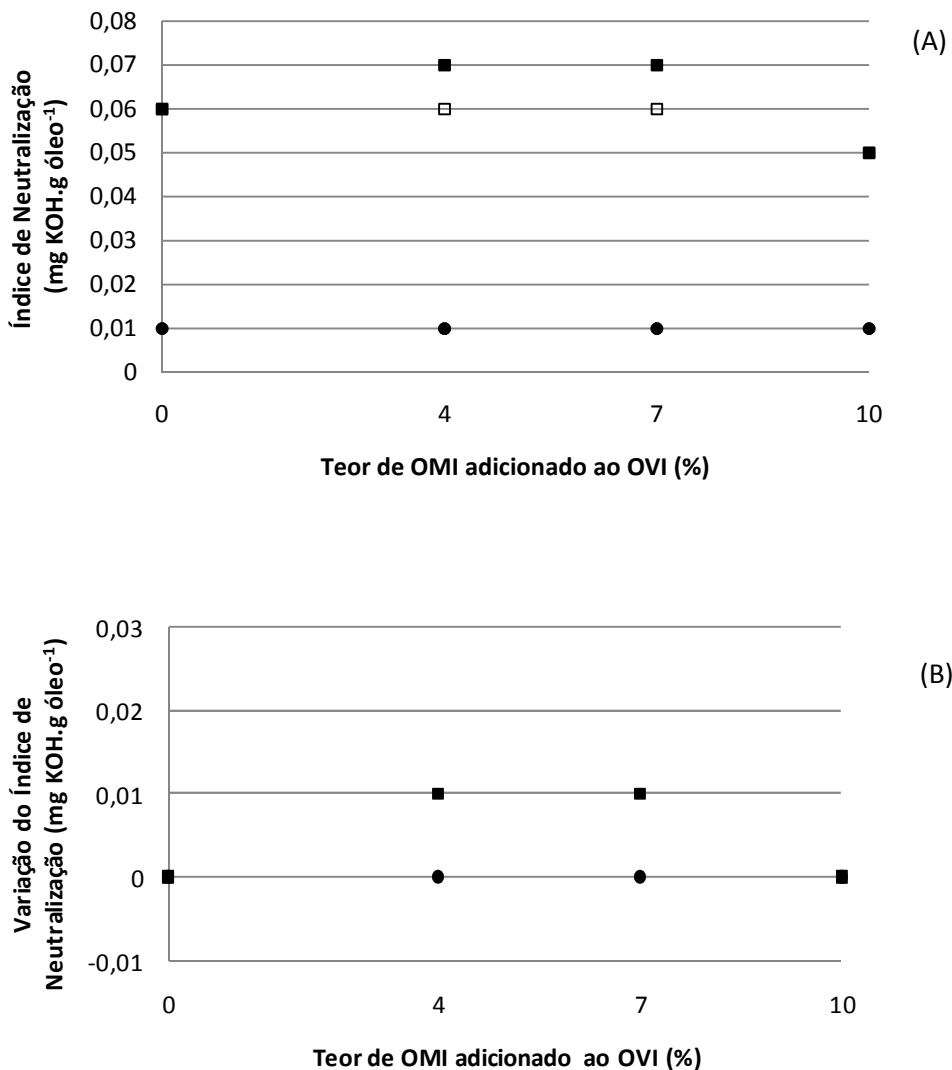


FIGURA 12. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o índice de neutralização, na presença de borracha de fluorsilicone: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha fluorsilicone (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e as provas brancas.

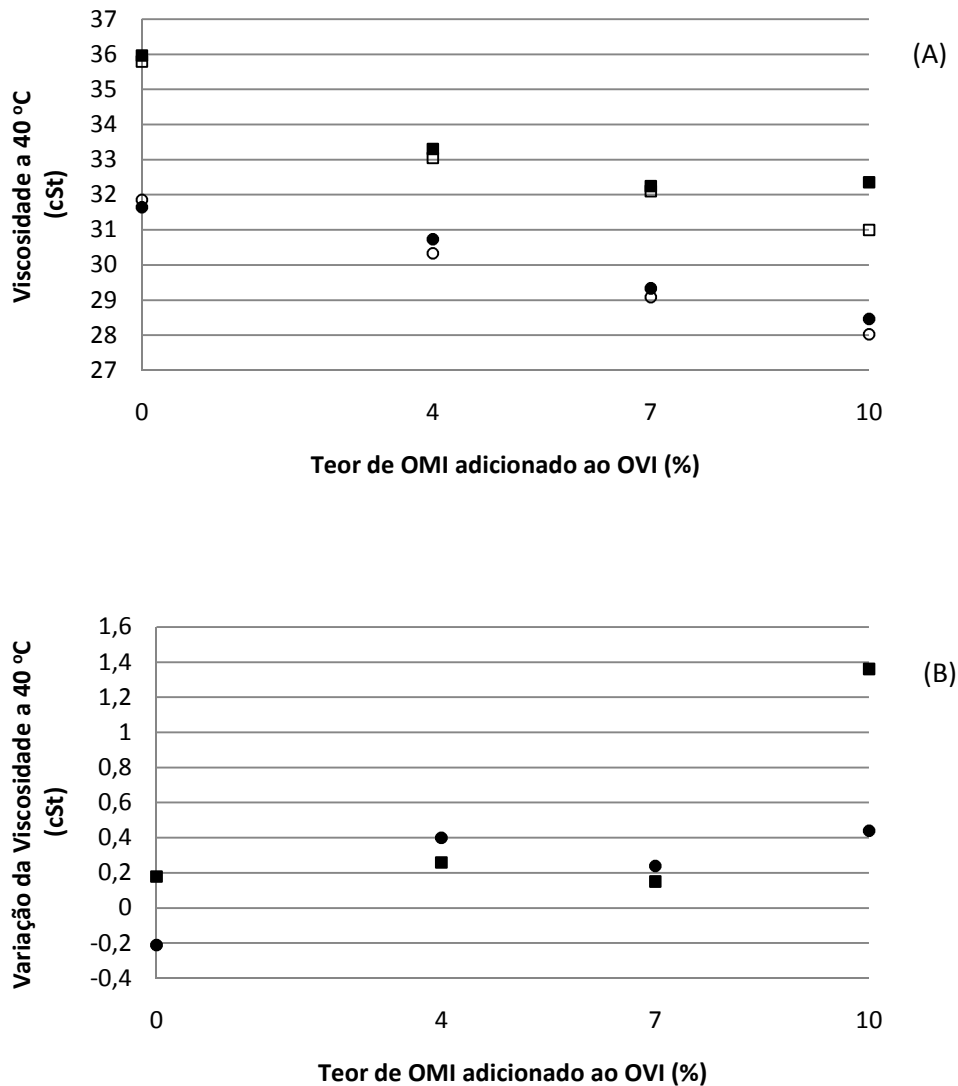


FIGURA 13. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre a viscosidade, na presença de borracha de fluorsilicone: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha fluorsilicone (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e as provas brancas.

Quanto ao fator de perdas dielétricas, pode se notar que na presença de fluorsilicone, as diversas misturas OMI/OVIs apresentaram valores mais altos em comparação às misturas na ausência deste material (Figura 13). Esta configuração reforça os resultados anteriores, que mostram uma elevação nos

valores de fator de perdas de todos os óleos isolantes testados na presença da borracha fluorsilicone (Figura 5). Diferentemente do caso da borracha nitrílica (item 4.5.1), o teor de OMI adicionado aos OVIs não afetou o fator de perdas dielétricas das misturas.

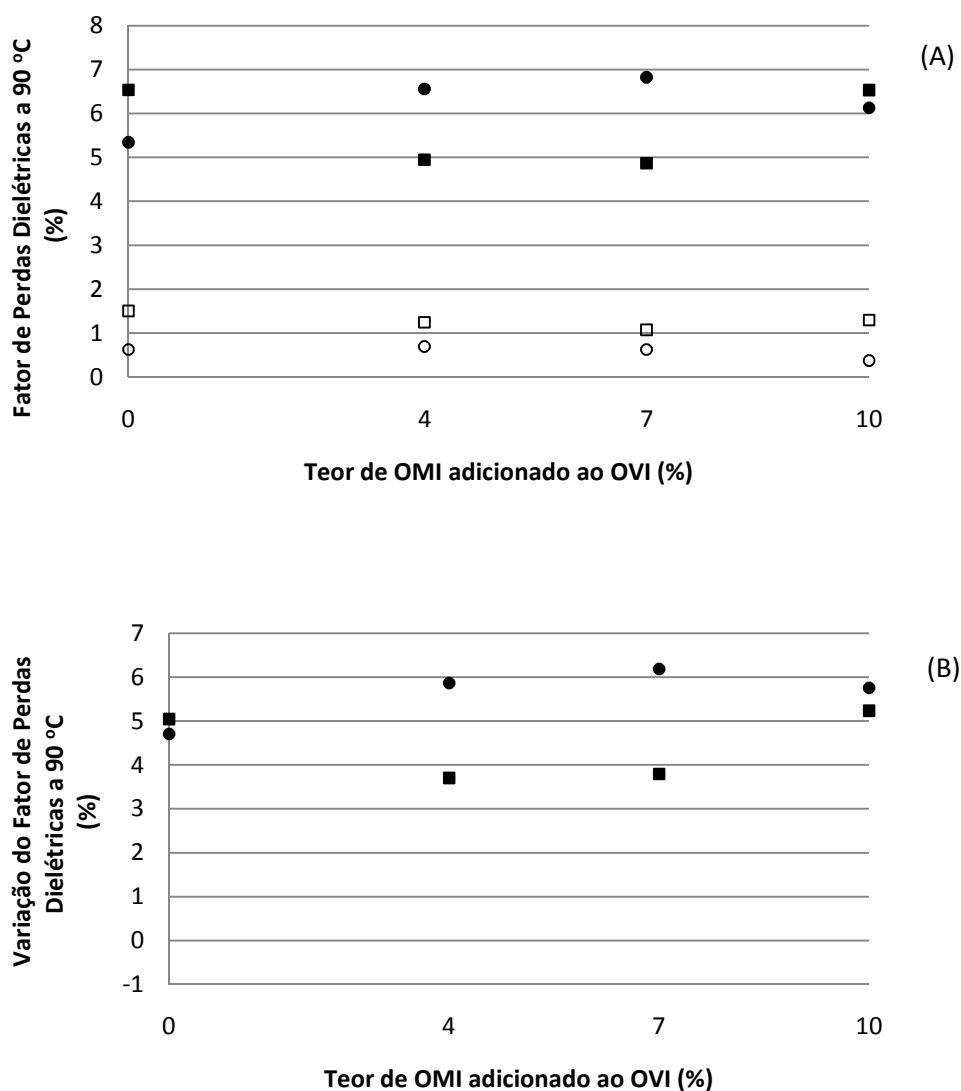


FIGURA 14. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C, na presença da borracha de fluorsilicone: (•) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da borracha fluorsilicone (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o fator de perdas das amostras e as provas brancas.

4.5.3. ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE DE MISTURAS OMI/OVI COM A BOLSA

Os resultados apresentados na Figura 14-A mostram que não houve variação da acidez com o aumento da adição de OMI aos OVIs, tanto na ausência bem como na presença da bolsa.

Tanto na presença quanto na ausência da bolsa, houve uma diminuição na viscosidade das misturas, proporcional ao teor de OMI adicionado, para ambos os OVIs (Figura 15-A). Não houve variação considerável nos valores da viscosidade em relação à prova em branco (Figura 15-B). A variação observada está dentro do erro de repetibilidade do método, que aceita uma variação de 0,35% do valor médio obtido (ABNT NBR 10441).

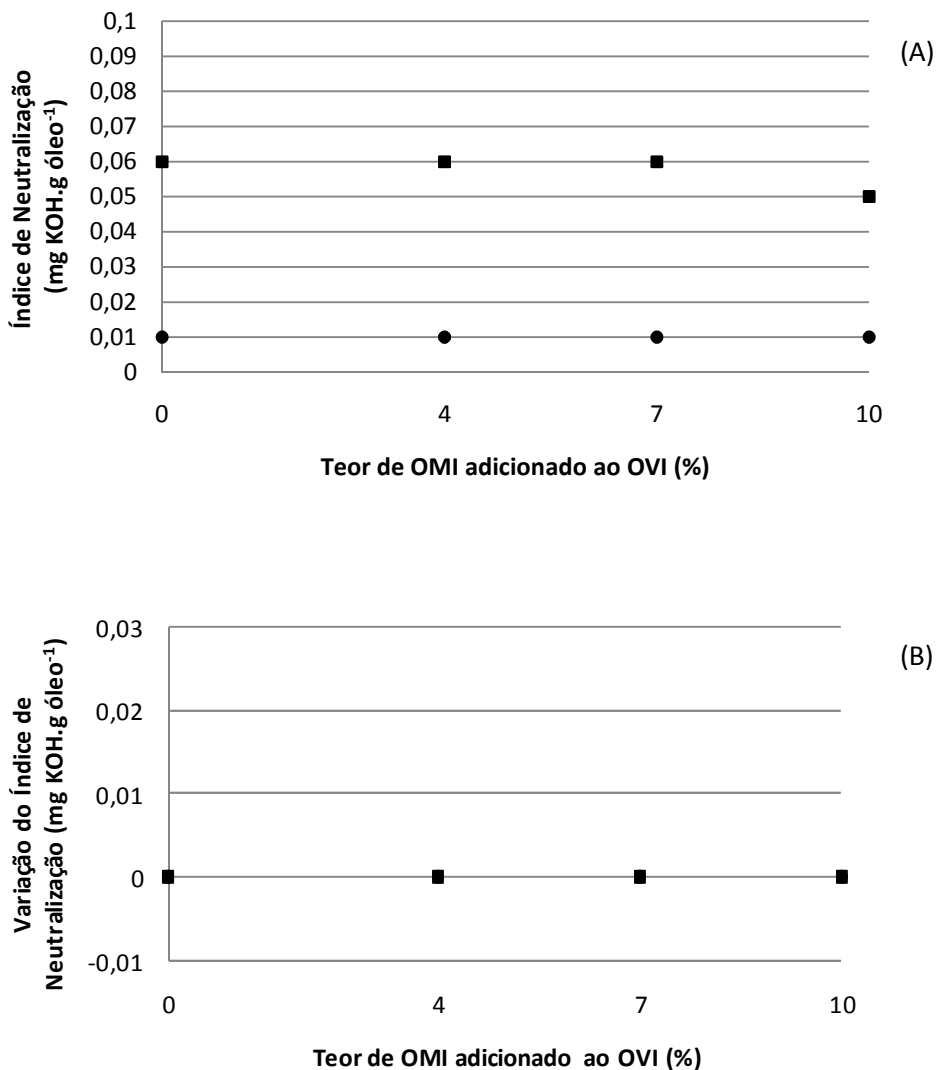


FIGURA 15. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o índice de neutralização, na presença da bolsa: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da bolsa: (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o índice de neutralização das amostras e as provas brancas.

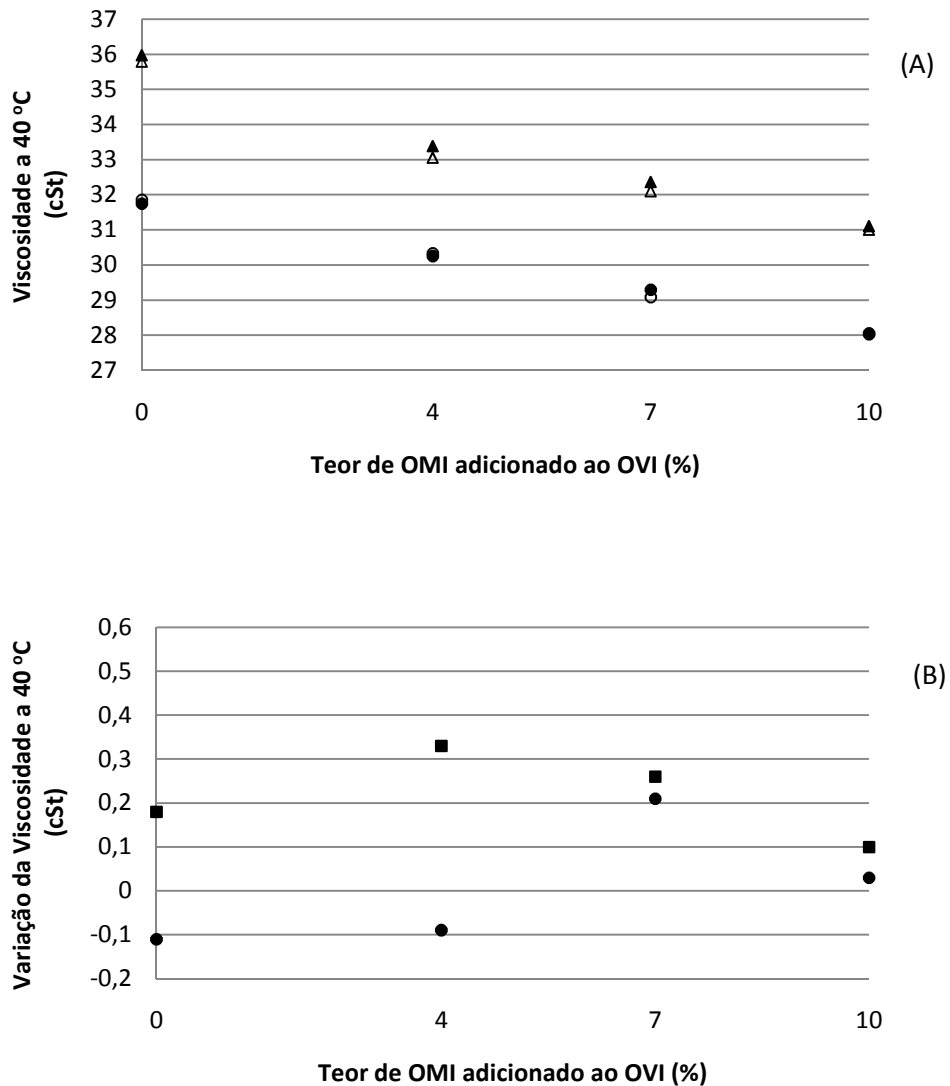


FIGURA 16. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre a viscosidade, na presença da bolsa: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da bolsa: (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre a viscosidade das amostras e as provas brancas.

O fator de perdas dielétricas foi consideravelmente maior para o Envirotemp FR3 e respectivas misturas, em comparação ao Biovolt A e respectivas misturas (Figura 16-A), na presença da bolsa, mostrando claramente que este material exerceu um efeito diferenciado nos dois OVIs

analisados. No entanto, este efeito manteve-se constante nas diferentes misturas analisadas (Figura 16-B).

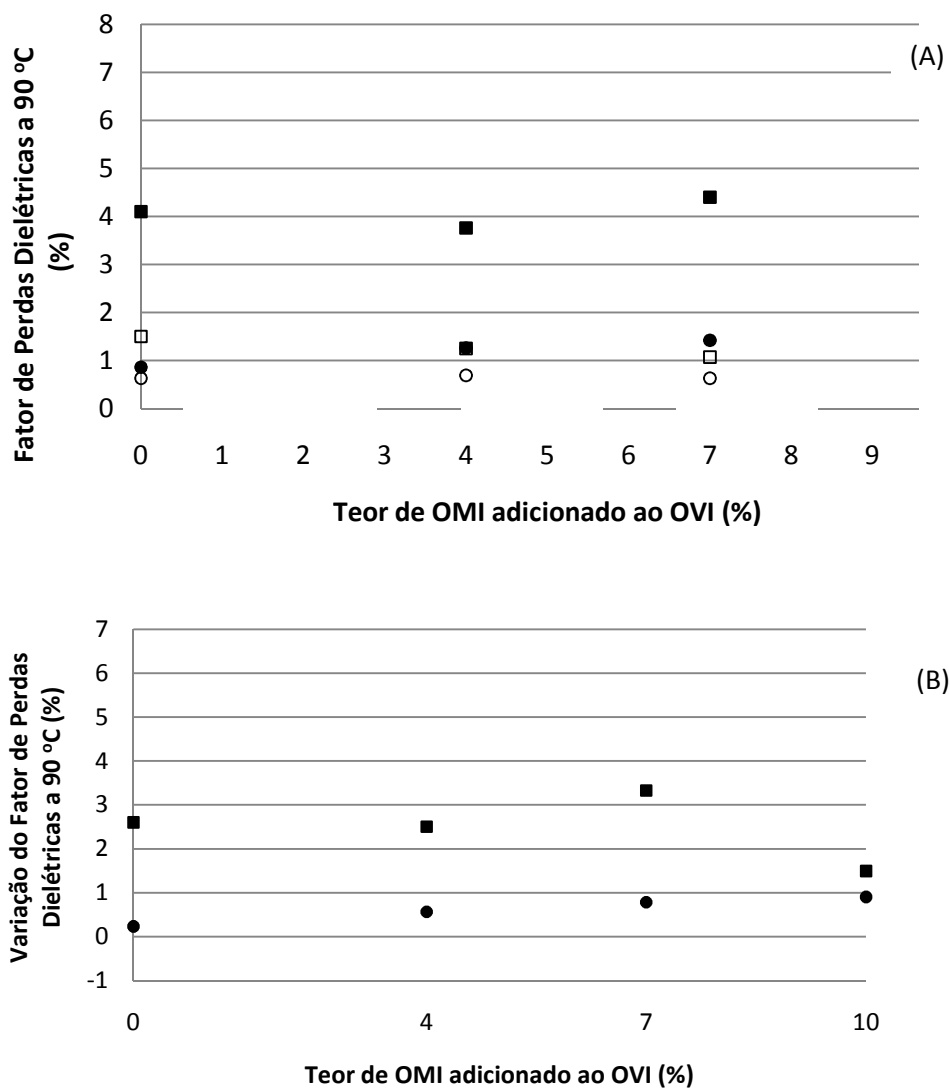


FIGURA 17. (A) Efeito da adição de OMI aos OVIs sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C, na presença da bolsa: (●) OMI/Biovolt A e (■) OMI/Envirotemp FR3; e na ausência da bolsa: (○) OMI/Biovolt A e (□) OMI/Envirotemp FR3. (B) Diferença entre o fator de perdas das amostras e as provas brancas.

4.6. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS FLUIDOS ISOLANTES NA AUSÊNCIA E PRESENÇA DE MATERIAIS

Neste item estão apresentados os resultados dos ensaios de envelhecimento acelerado dos óleos isolantes na ausência e presença dos seguintes materiais: papel Kraft (item 4.6.1.), aço silício (item 4.6.2.), borracha fluorsilicone (item 4.6.3.), bolsa (item 4.6.4.) e borracha nitrílica (item 4.6.5.).

4.6.1. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM PAPEL KRAFT

O Biovolt A e o OMI não apresentaram alterações no índice de neutralização até 700 h de envelhecimento em estufa, a 100 °C, tanto na presença quanto na ausência de papel Kraft (Figura 17-A). O óleo Envirotemp FR3 apresentou um pequeno aumento após 300 h, devido a formulação distinta deste tipo de óleo. Mas, como este aumento foi semelhante tanto na presença quanto na ausência do material as variações de acidez em relação à prova em branco (Figura 17-B) não ultrapassaram 0,02 mg KOH/g óleo, nas condições utilizadas neste estudo.

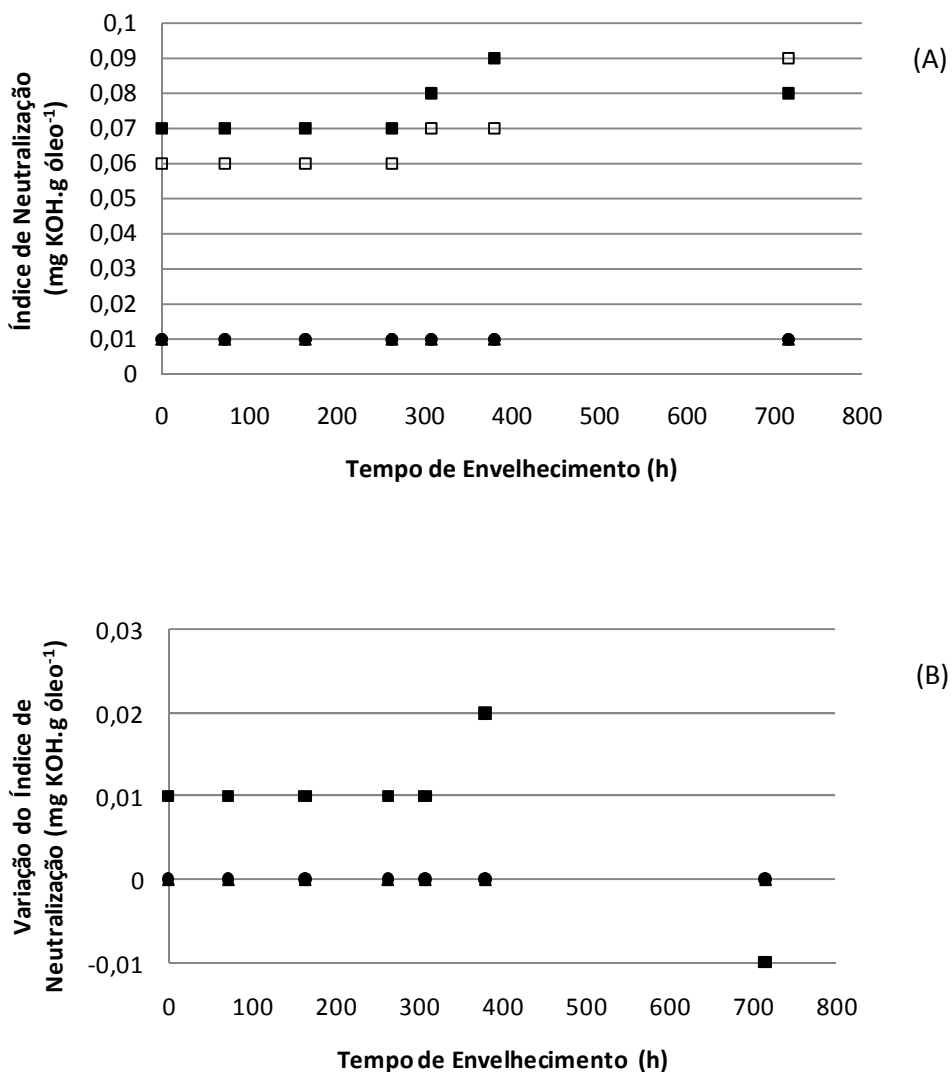


FIGURA 18. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de papel Kraft isolante: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de papel Kraft isolante: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco.

Quanto ao fator de perdas dielétricas (Figura 18-A), os óleos isolantes analisados apresentaram valores na seguinte ordem: Envirotemp FR3 > Biovolt A > OMI. No entanto, nem o papel e nem o tempo de envelhecimento afetaram significativamente o fator de perdas dos óleos analisados. A variação máxima

registrada para os óleos analisados na presença do papel Kraft em relação às provas brancas foi de 0,4% (Figura 18-B). Acredita-se que esta variação corresponde ao erro aceitável do método de análise e do equipamento utilizados neste estudo.

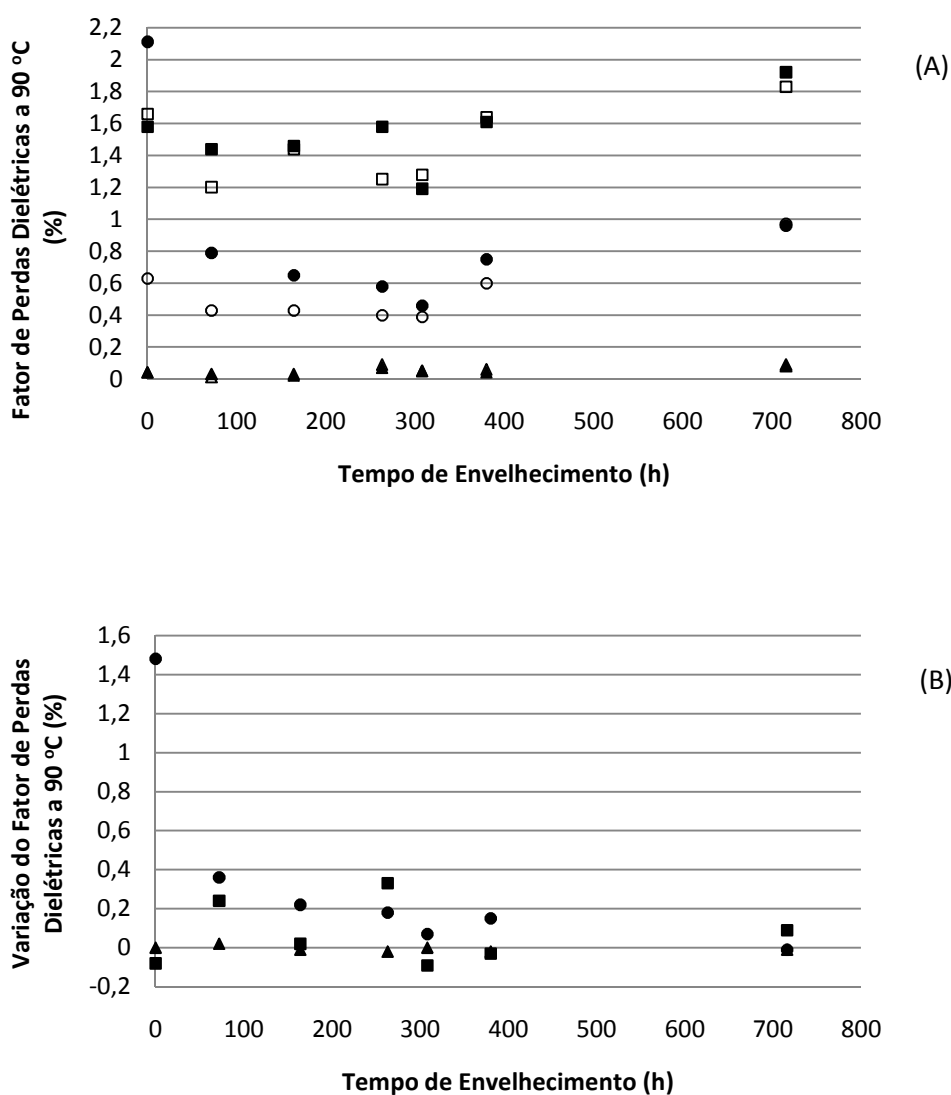


FIGURA 19. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de papel Kraft isolante: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de papel Kraft isolante: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco.

Na ausência e presença de material o Envirotemp FR3 apresentou maior viscosidade que o Biovolt A durante todo envelhecimento realizado (Figura 19-A). Como nem o material (papel) e nem o tempo de envelhecimento afetaram este parâmetro (Figura 19-A), pode-se concluir que a variação observada deve-se exclusivamente a diferença de formulação destes dois tipos de óleos. A variação máxima observada para este ensaio foi de 0,15 cSt, valor dentro do erro experimental do método de análise (Figura 19-B).

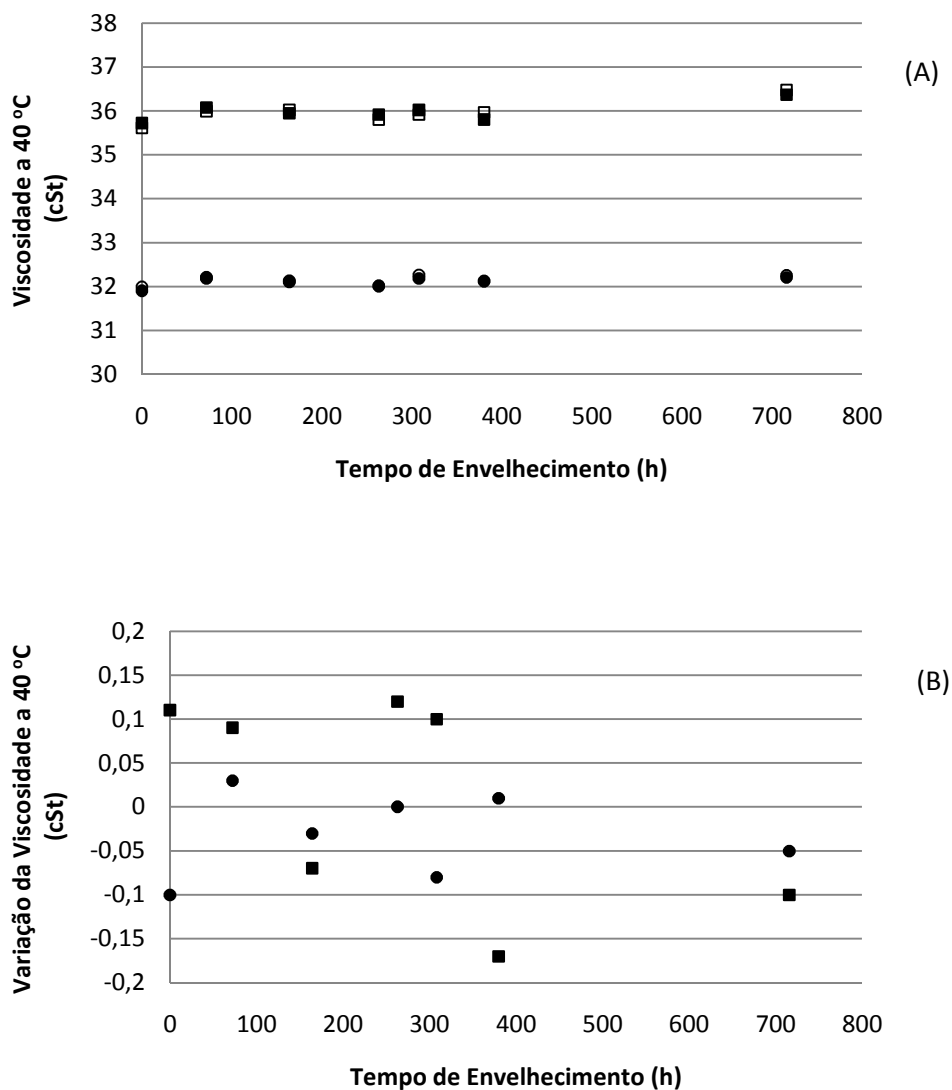


FIGURA 20. (A) Variação da viscosidade cinemática a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de papel Kraft isolante: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de papel Kraft isolante: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco.

Foi medida também a tensão interfacial do OMI durante o envelhecimento acelerado realizado na presença e ausência de papel Kraft isolante (Figura 21). Não foi possível observar uma variação significativa na tensão interfacial do

OMI ao longo do ensaio de envelhecimento acelerado tanto na presença quanto na ausência do papel (Figura 21).

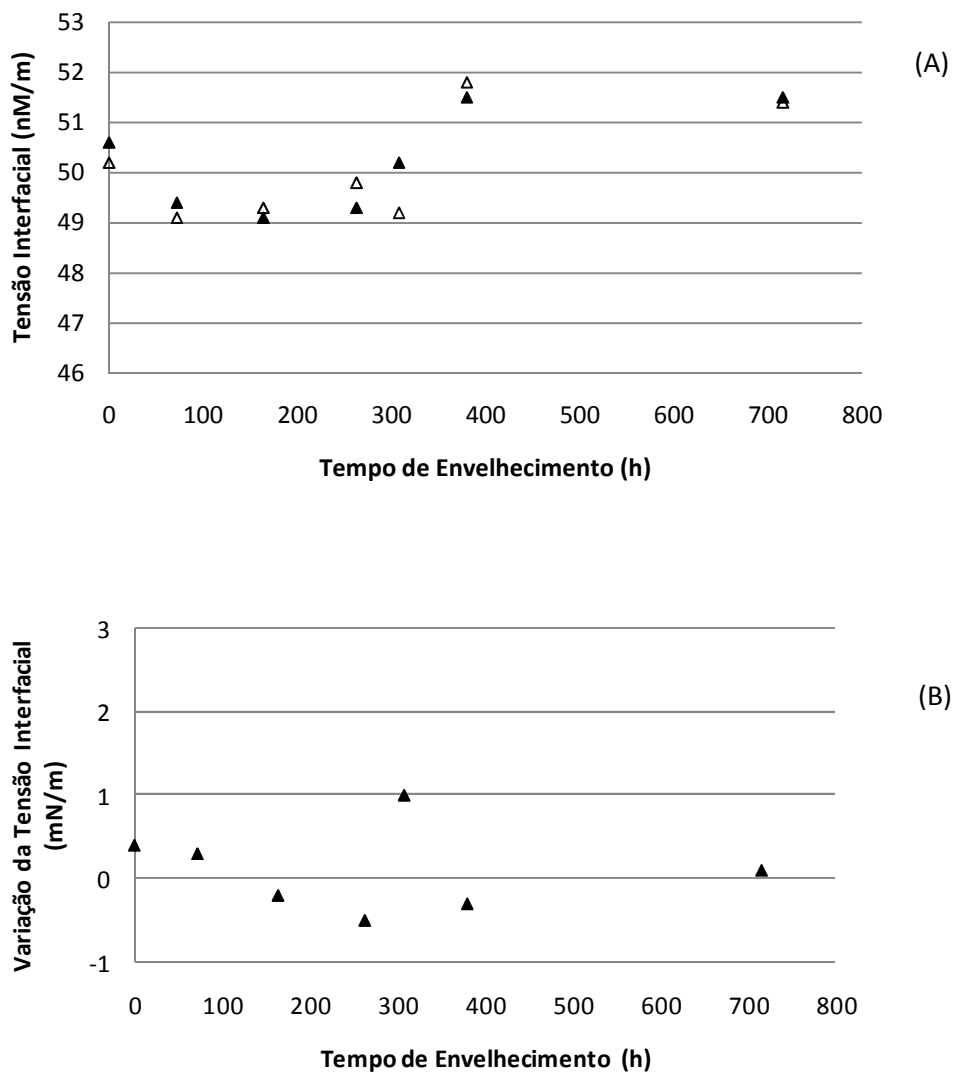


FIGURA 21. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença de papel Kraft isolante: (▲) OMI; e na ausência de papel Kraft isolante: (Δ) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco.

4.6.2. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM AÇO SILÍCIO

A presença do aço silício não afetou significativamente a acidez dos óleos isolantes em função do tempo de envelhecimento (Figura 21-A). A variação máxima do índice de neutralização das amostras em relação à prova em branco foi de 0,01 mg KOH/g (Figura 21-B).

O tempo de envelhecimento não afetou o fator de perdas dielétricas dos óleos isolantes na presença e ausência de aço silício (Figura 22).

O tempo de envelhecimento de 700 h também não afetou a viscosidade dos óleos testados, tanto na presença quanto na ausência do aço silício. A variação máxima observada para a viscosidade foi de 0,38 cSt, valor dentro do erro experimental do método de análise (Figura 23).

Novamente podem ser observadas pequenas diferenças nas características dos óleos Envirotemp FR3 e Biovolt A ao longo do envelhecimento acelerado, decorrentes da formulação distinta adotada pelos fabricantes destes fluidos.

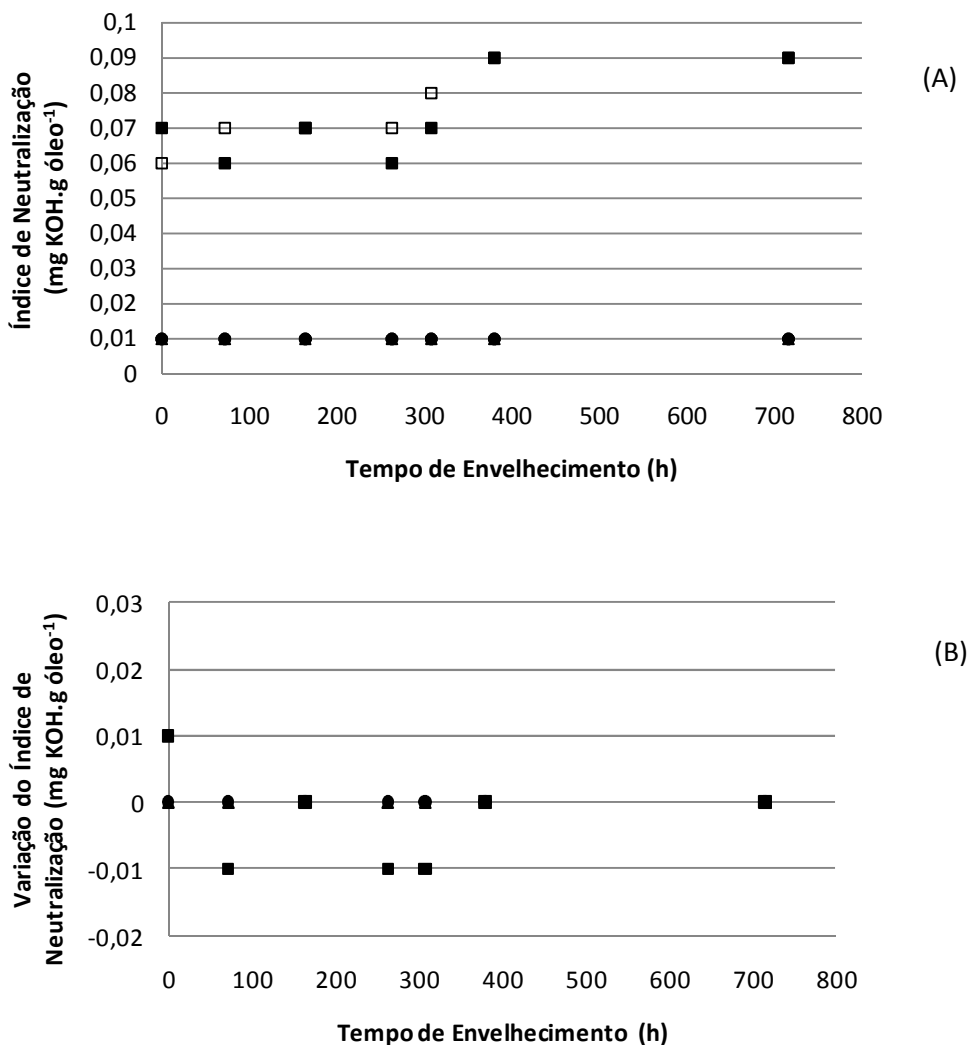


FIGURA 22. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de aço silício: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco.

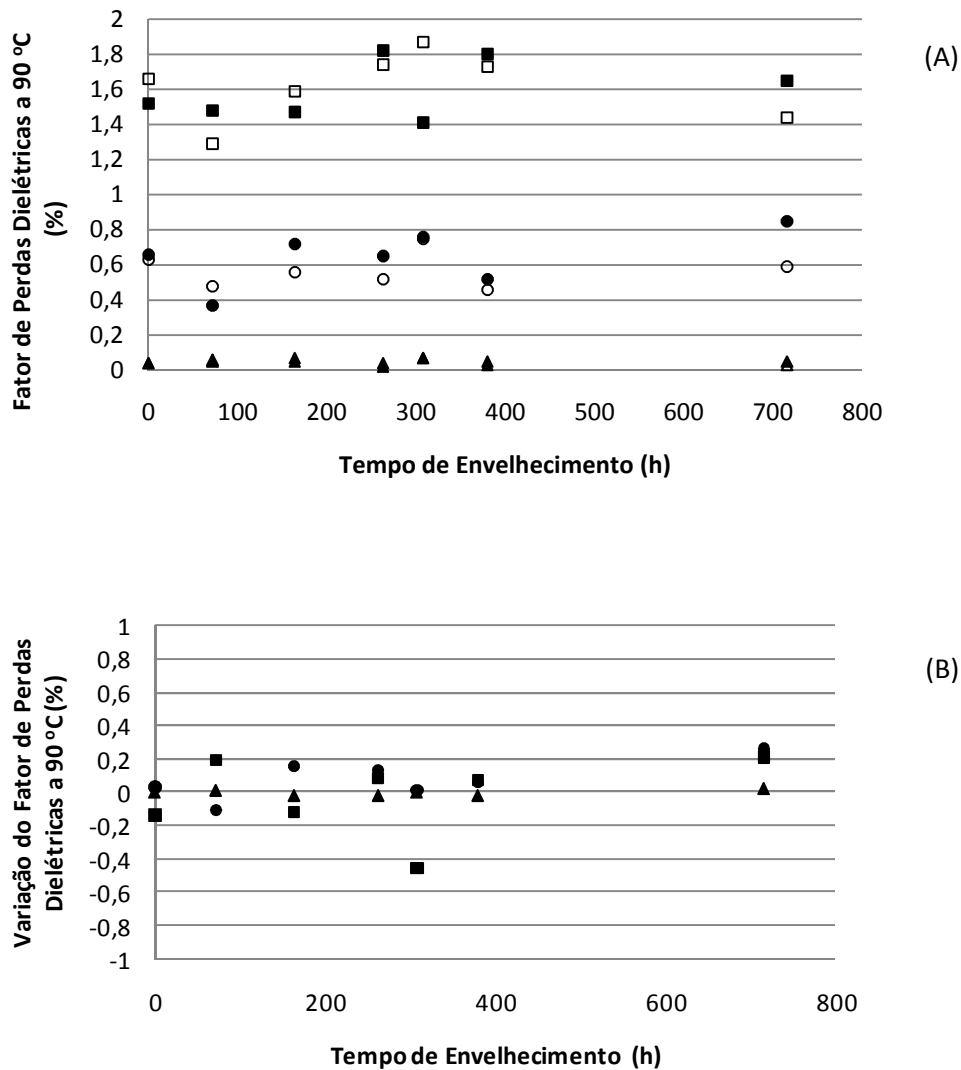


FIGURA 23. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de aço silício: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco.

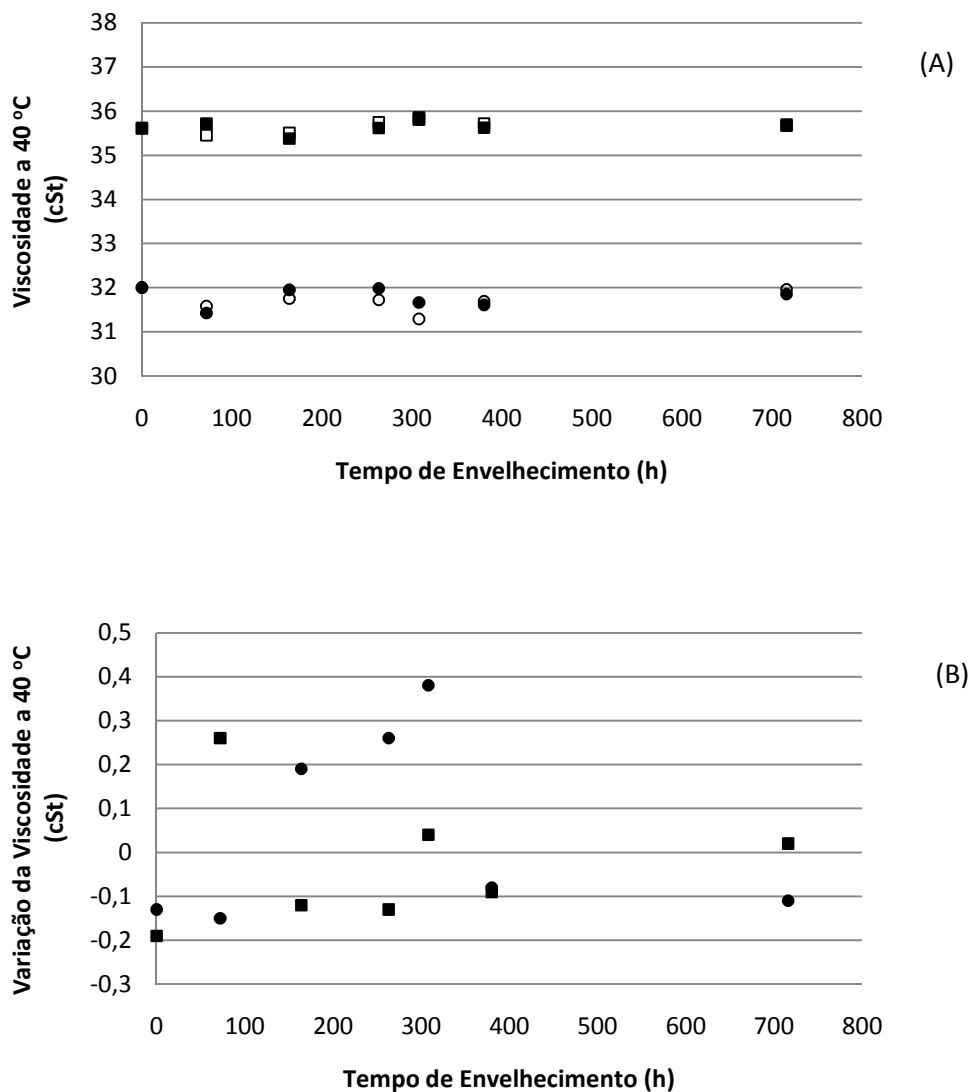


FIGURA 24. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença de aço silício: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco.

A tensão interfacial do OMI medida ao longo do ensaio de envelhecimento acelerado apresentou pequenas variações (Figura 24-A), inferiores a 3 mN/m (Figura 24-B).

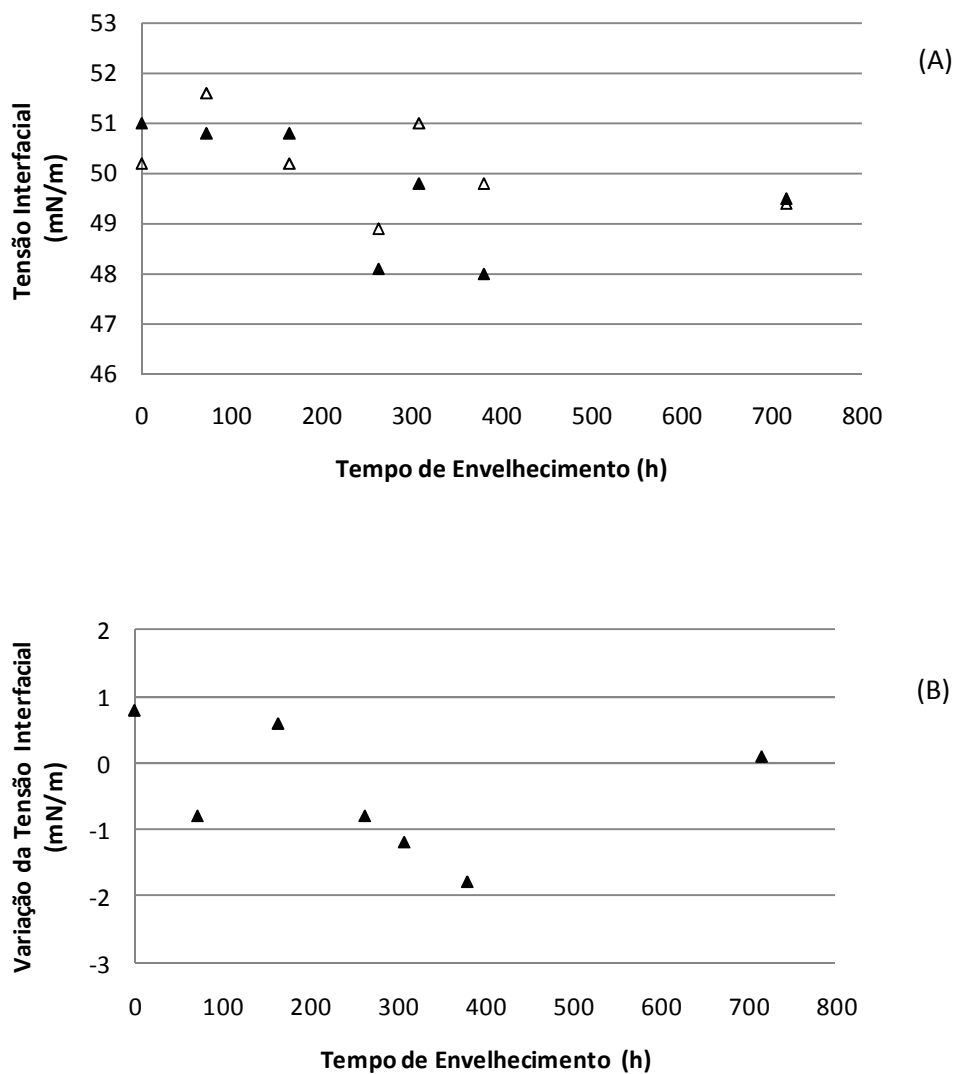


FIGURA 25. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença de aço silício: (▲) OMI; e na ausência de aço silício: (Δ) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco.

4.6.3. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM BORRACHA DE FLUORSILICONE

Na Figura 25-A nota-se que o óleo Envirotemp FR3 apresentou uma elevação contínua em comparação ao Biovolt A, mas insignificante, no índice de neutralização tanto na presença quanto na ausência da borracha de fluorsilicone. Porém, a variação máxima observada para este parâmetro foi de 0,02 mg KOH/g (Figura 25-B), com exceção da amostra a 300 h, que apresentou um valor aproximado de 0,03 mg KOH/g, provavelmente devido a um erro experimental.

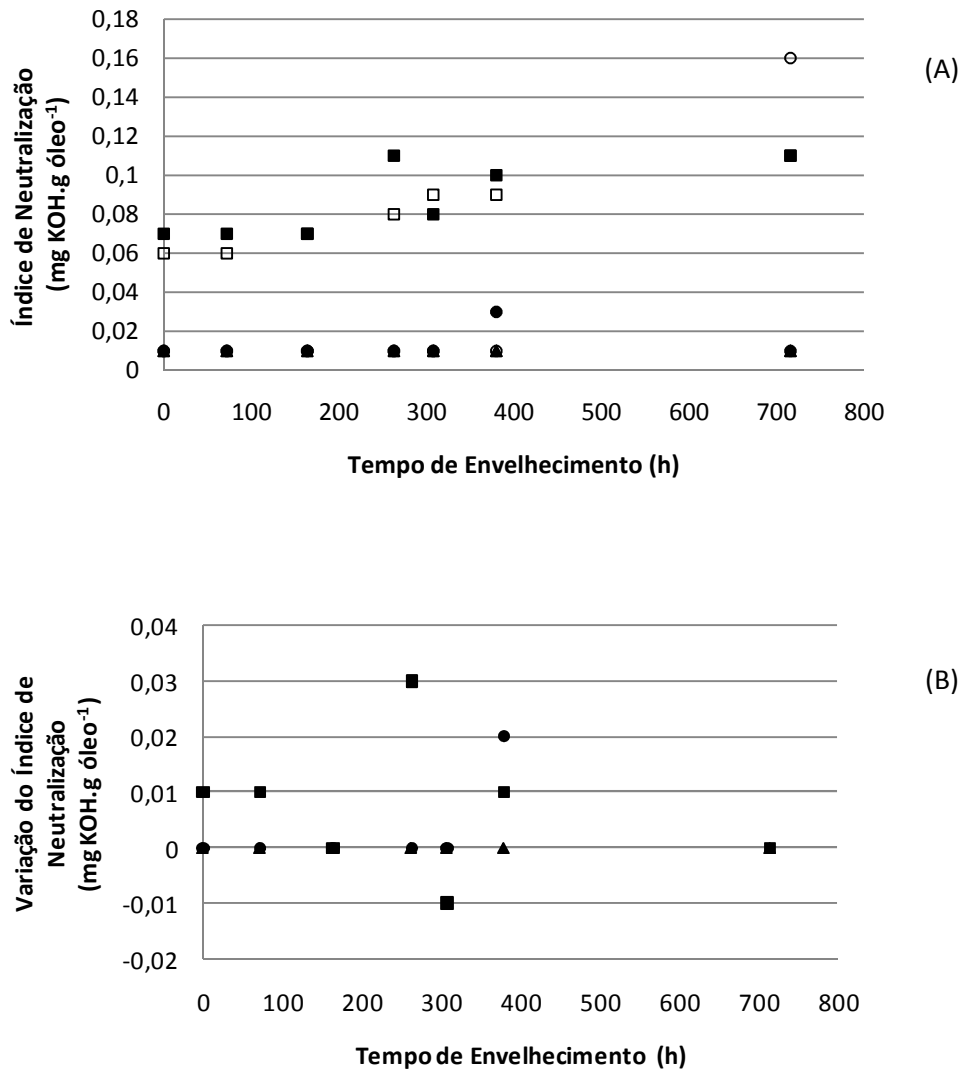


FIGURA 26. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha de fluorsilicone: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha de fluorsilicone: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco.

O fator de perdas dielétricas foi alterado significativamente na presença da borracha fluorsilicone (Figura 26), com variação média de 4% para todos os óleos testados.

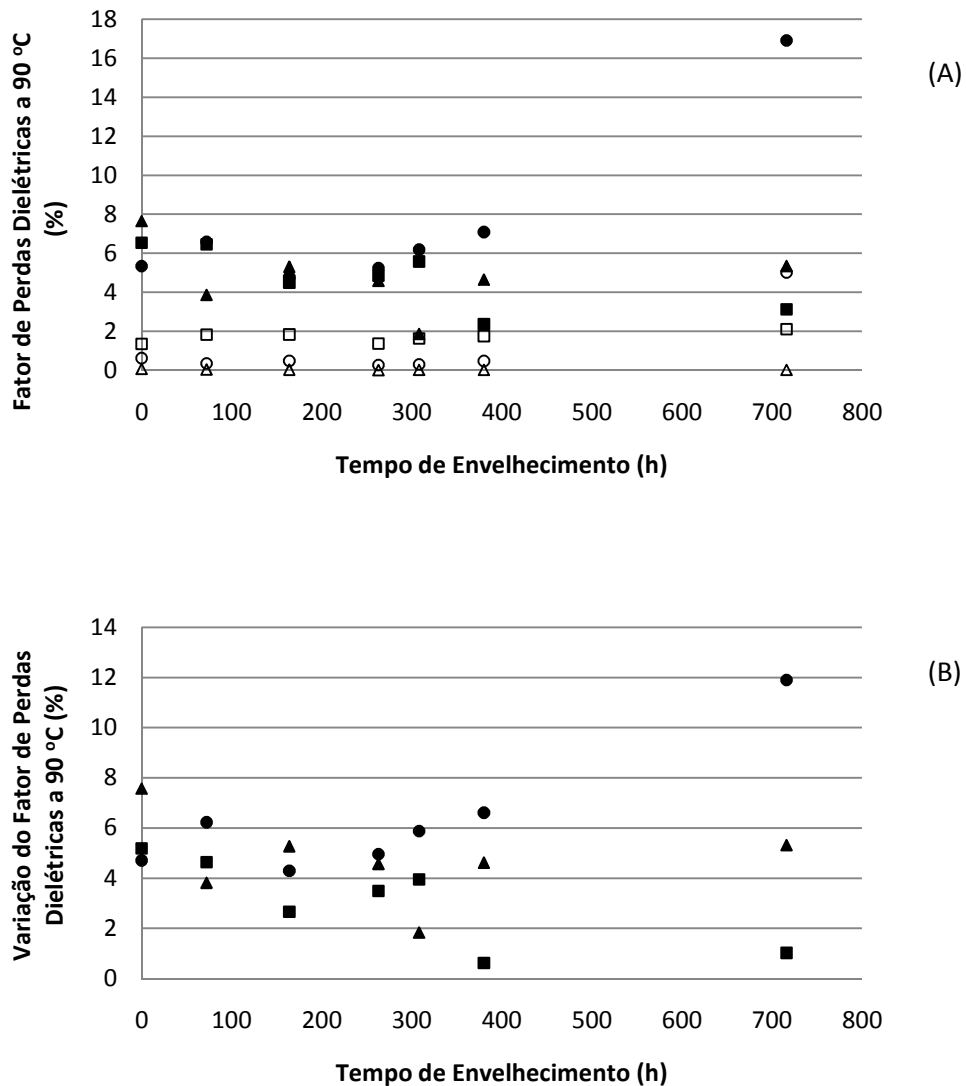


FIGURA 27. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha de fluorsilicone: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha de fluorsilicone: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco.

A viscosidade dos óleos não foi alterada significativamente, tanto na presença quanto na ausência de borracha de fluorsilicone, durante o tempo de envelhecimento (Figura 27-A). Exceto nas 716 horas de envelhecimento do Biovolt A, em que houve uma diferença maior entre a viscosidade da amostra

com material e a viscosidade da amostra sem o material, fato atribuído a um erro experimental.

A maior variação, cerca de 0,4 cSt no valor da viscosidade, ocorreu nas 380 horas de envelhecimento do Biovolt A (Figura 27-B). Porém esta variação não é representativa na linha do tempo de realização do ensaio.

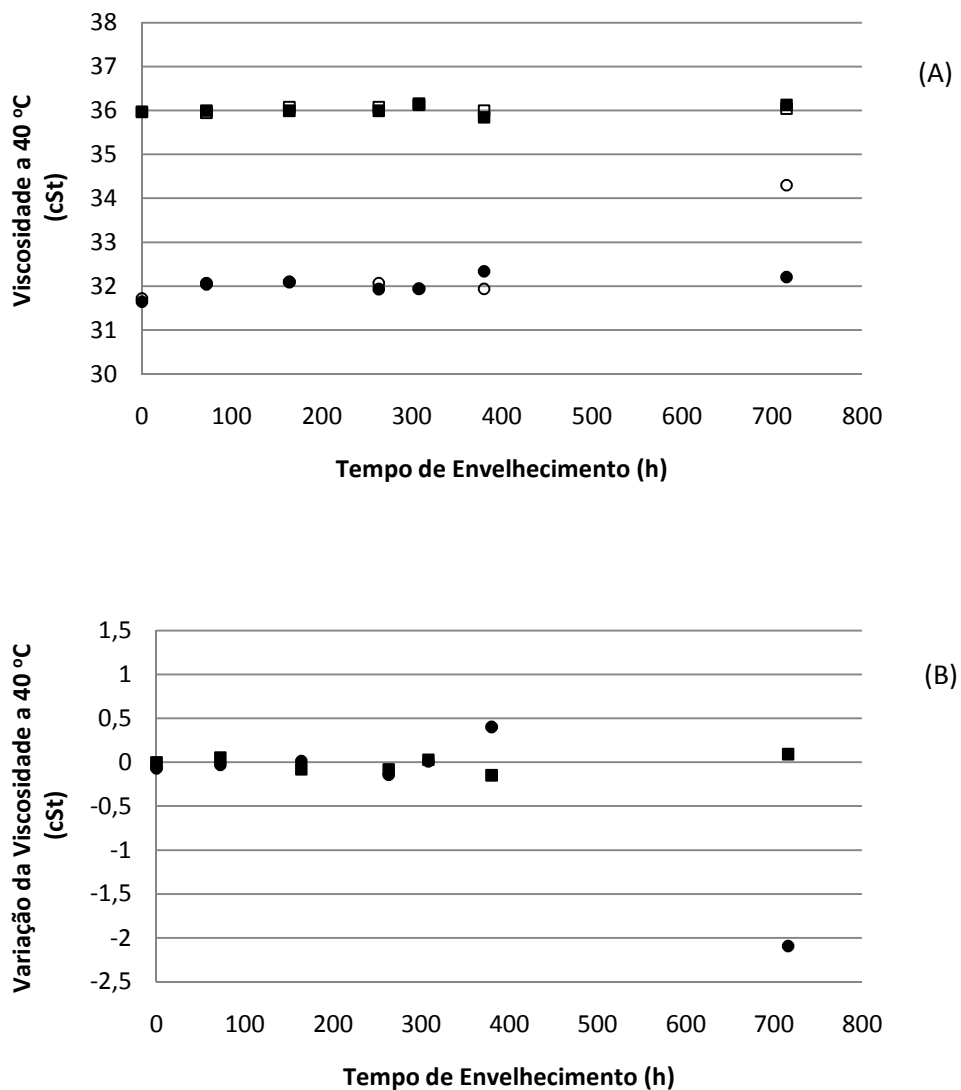


FIGURA 28. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha de fluorsilicone: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha de fluorsilicone: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (Δ) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco.

Nota-se que a presença da borracha fluorsilicone diminuiu bastante a tensão interfacial do OMI (Figura 28-A), conforme constatado anteriormente (item 4.2.) e que essa diminuição (mais de 20 mN/m) se manteve constante ao longo do tempo de envelhecimento (Figura 28-B).

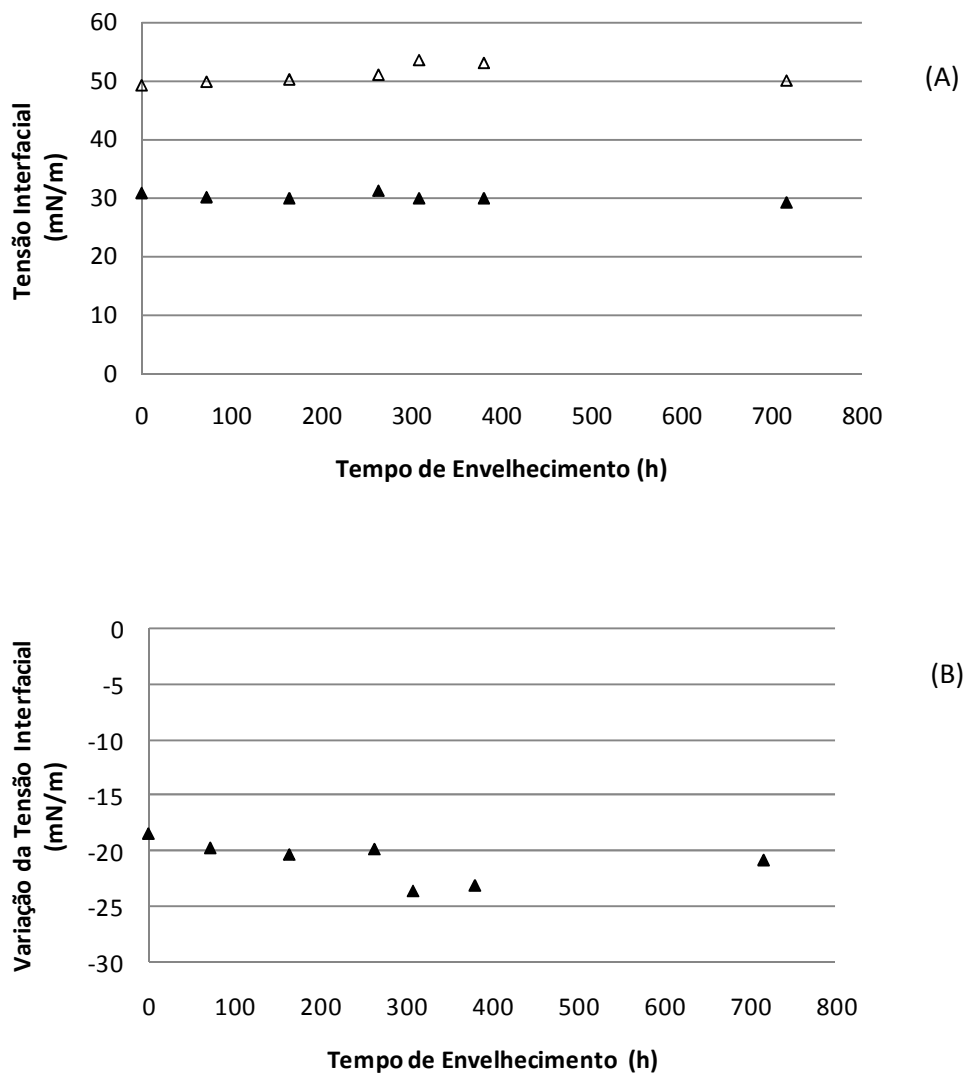


FIGURA 29. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença da borracha de fluorsilicone: (▲) OMI; e na ausência da borracha de fluorsilicone: (△) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco.

4.6.4. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS ISOLANTES COM A BOLSA

De acordo com a Figura 29-A, a acidez dos fluidos analisados não sofreu variação na ausência ou presença da bolsa. Exceto para as amostras com Envirotemp FR3, cuja variação do índice de neutralização foi crescente em função do tempo de envelhecimento, comportamento não observado para os demais materiais testados. Esse efeito pode ser atribuído a formulação distinta deste óleo em relação ao Biovolt A.

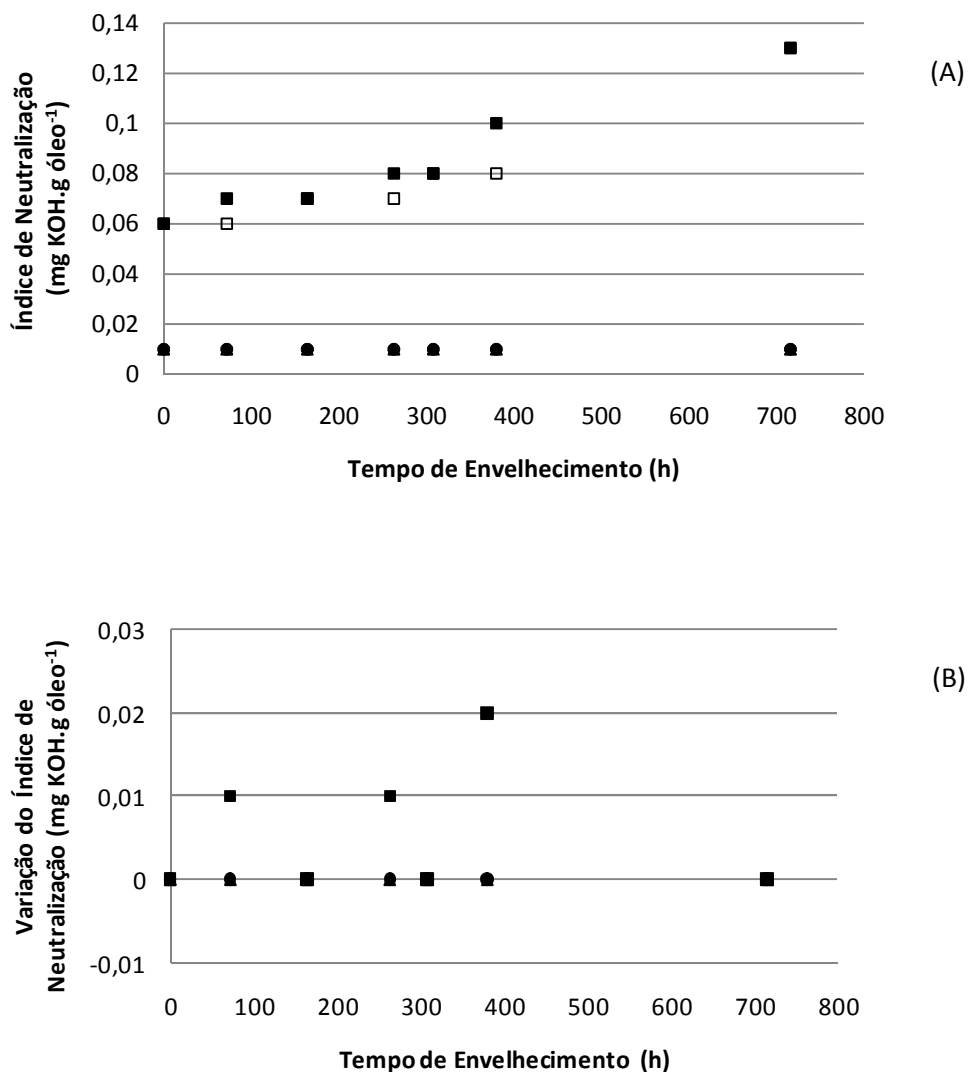


FIGURA 30. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da bolsa: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco.

Para o OMI, a presença da bolsa não afetou o fator de perdas dielétricas ao longo do tempo de envelhecimento acelerado (Figuras 30-A e 30-B).

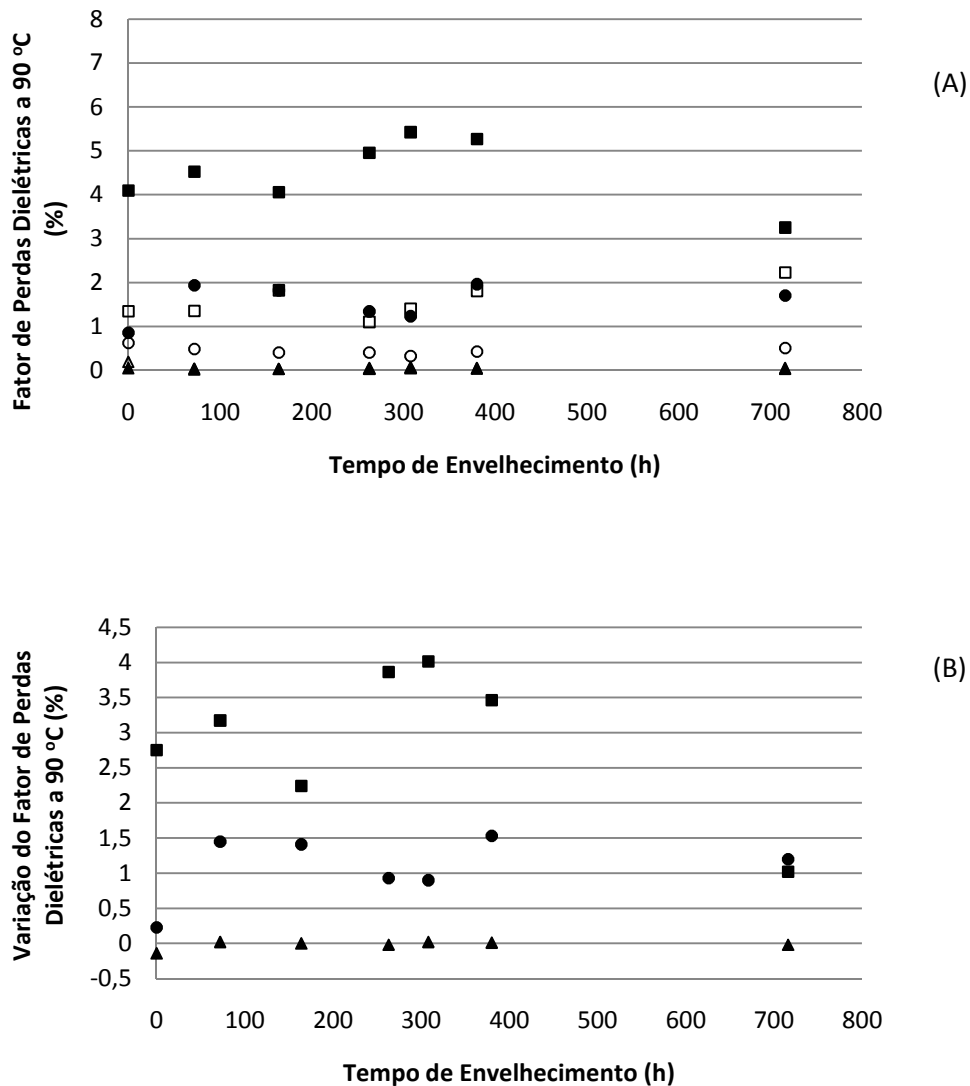


FIGURA 31. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da bolsa: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco.

A viscosidade não foi alterada significativamente com o tempo de envelhecimento para nenhum dos óleos analisados (Figura 31-A). A maior variação no valor de viscosidade foi constatada no Envirotemp FR3, após 380

horas de envelhecimento, correspondendo a 0,2 cSt (Figura 31-B). Contudo, tal variação está dentro do erro de repetibilidade do método.

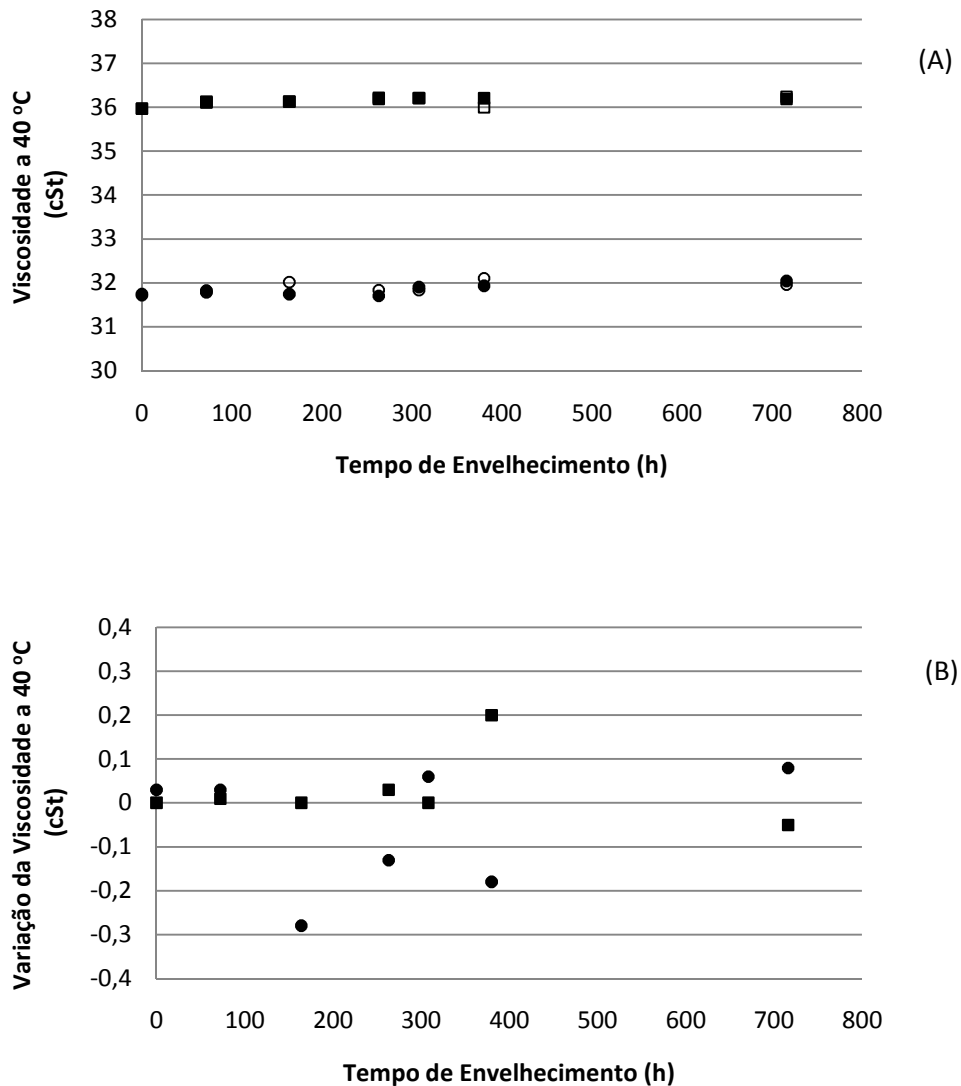


FIGURA 32. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da bolsa: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR e (△) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco.

Observando a Figura 32-A, nota-se que a presença da bolsa, reduziu em muito a tensão interfacial do OMI indicando que algum componente do material da bolsa está afetando a qualidade do OMI.

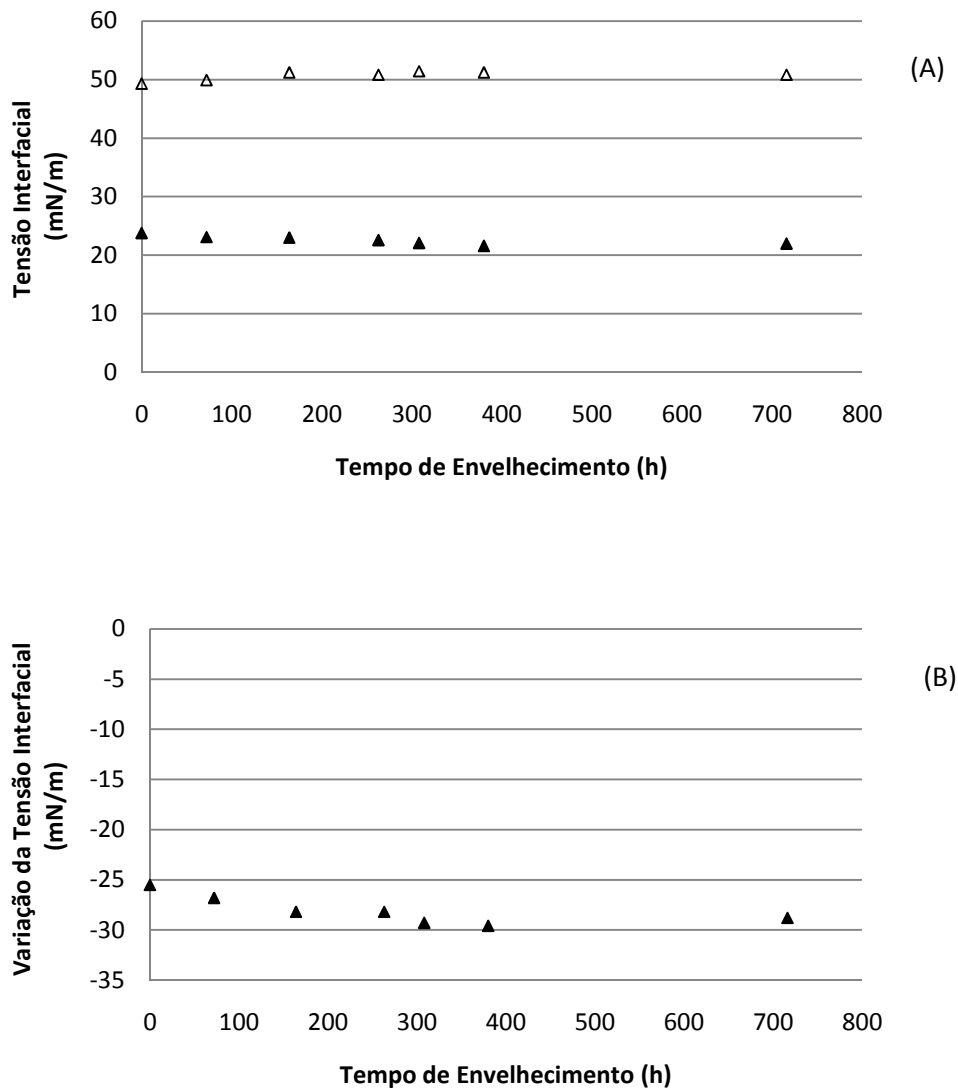


FIGURA 33. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença da bolsa: (▲) OMI; e na ausência da bolsa: (△) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco.

4.6.5. ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO COM BORRACHA NITRÍLICA

Analisando a Figura 33, nota-se que não houve variação significativa do índice de neutralização das amostras de óleo com o decorrer do tempo de envelhecimento.

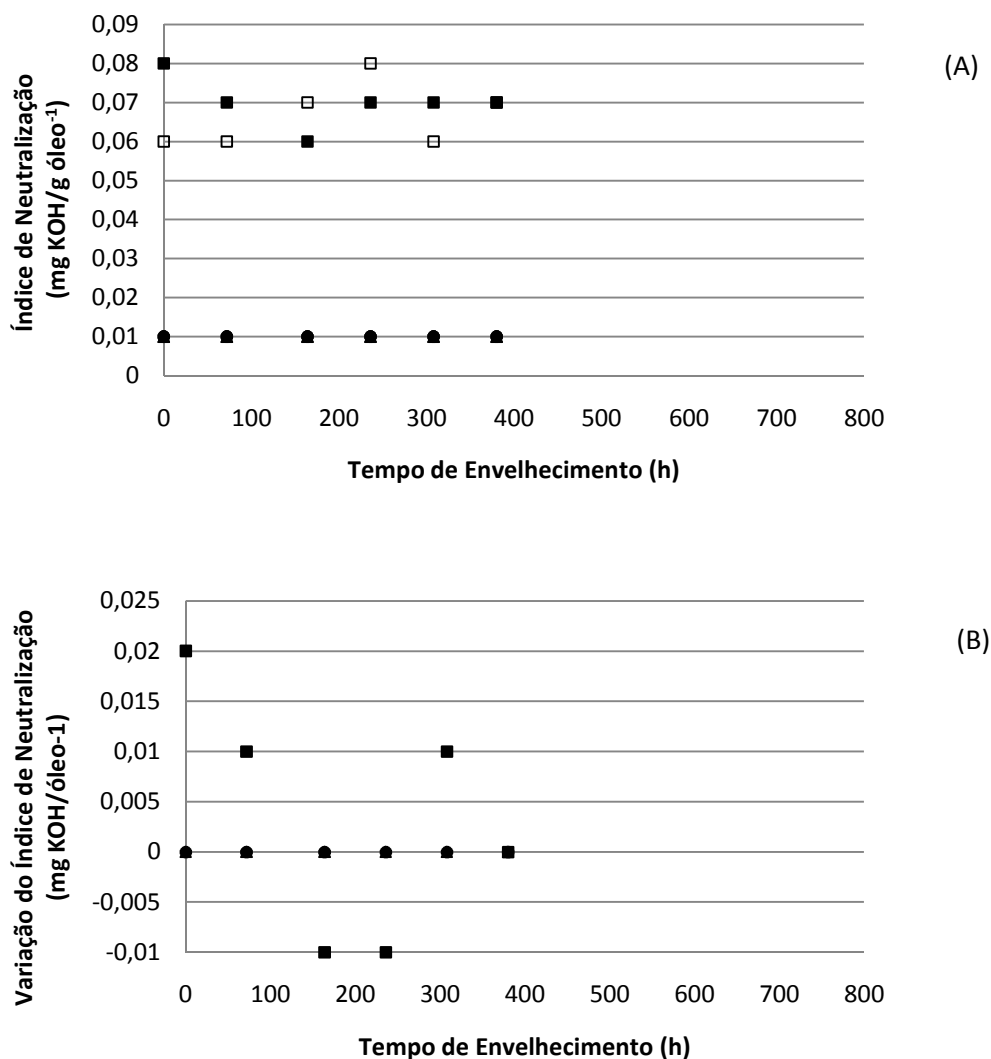


Figura 34. (A) Variação do índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha nitrílica: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha nitrílica: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do índice de neutralização das amostras em relação ao branco.

Não houve variação significativa do fator de perdas dielétricas nas diferentes amostras avaliadas, na presença ou ausência de borracha nitrílica, exceto para as amostras com Envirotemp FR3 na presença do material analisado, onde pode ser observado um crescimento do fator de perdas dielétricas com o decorrer do tempo de envelhecimento (Figura 34).

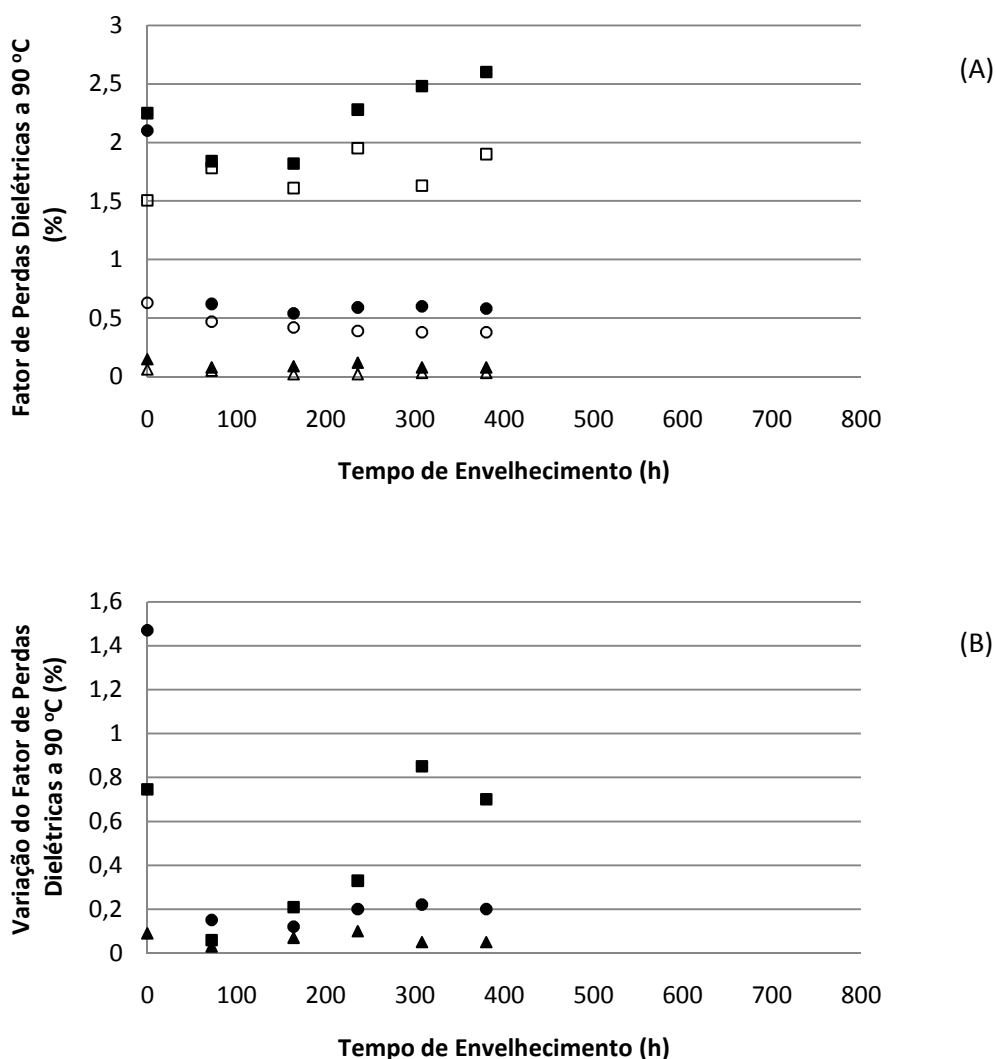


Figura 35. (A) Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha nitrílica: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha nitrílica: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR3 e (△) OMI. (B) Diferença do fator de perdas das amostras em relação ao branco.

Não houve variação significativa na viscosidade durante o tempo de envelhecimento dos diferentes óleos analisados, tanto na presença quanto na ausência da borracha nitrílica (Figura 35).

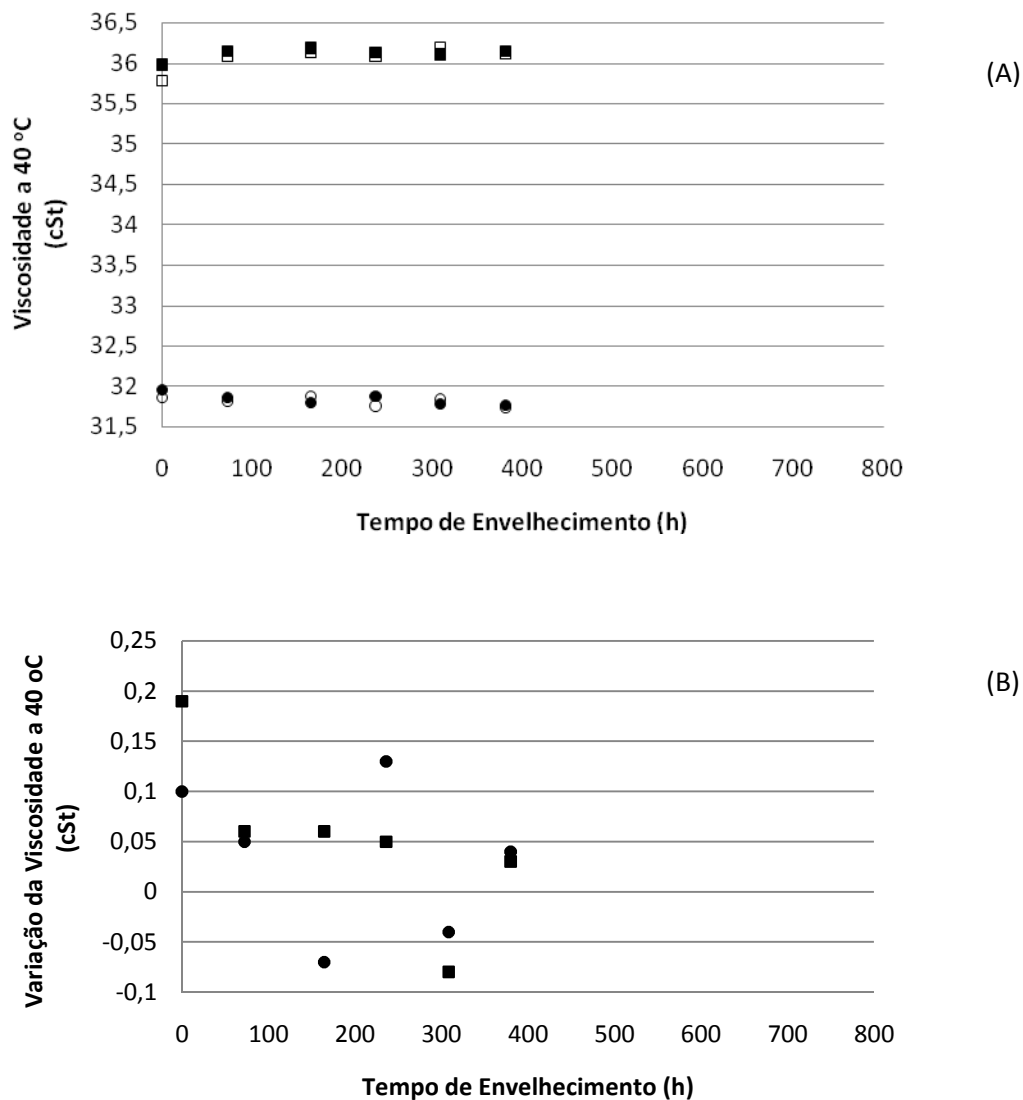


Figura 36. (A) Variação da viscosidade a 40 °C em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, dos óleos isolantes na presença da borracha nitrílica: (●) Biovolt A, (■) Envirotemp FR3 e (▲) OMI; e na ausência da borracha nitrílica: (○) Biovolt A, (□) Envirotemp FR e (△) OMI. (B) Diferença da viscosidade das amostras em relação ao branco.

De acordo com a Figura 36-A, nota-se que a variação da tensão interfacial do OMI diminuiu na presença da borracha nitrílica em comparação as amostras sem o material em teste (prova em branco). Pode-se perceber também, na Figura 36-B, que a variação da tensão das amostras em relação aos brancos apresentou valores abaixo da especificação da norma ABNT NBR 14274 (diminuição de 5 mN/m), e que tal resultado é observado já nas primeiras amostras analisadas, ou seja, dentro das primeiras 164 horas de ensaio.

De uma forma geral, os resultados apresentados na secção 4.6 comprovaram que 164 horas é de fato um intervalo de tempo adequado para realizar o ensaio de compatibilidade, não havendo necessidade de estender o tempo de duração do ensaio quando o fluido sob investigação for o óleo vegetal isolante.

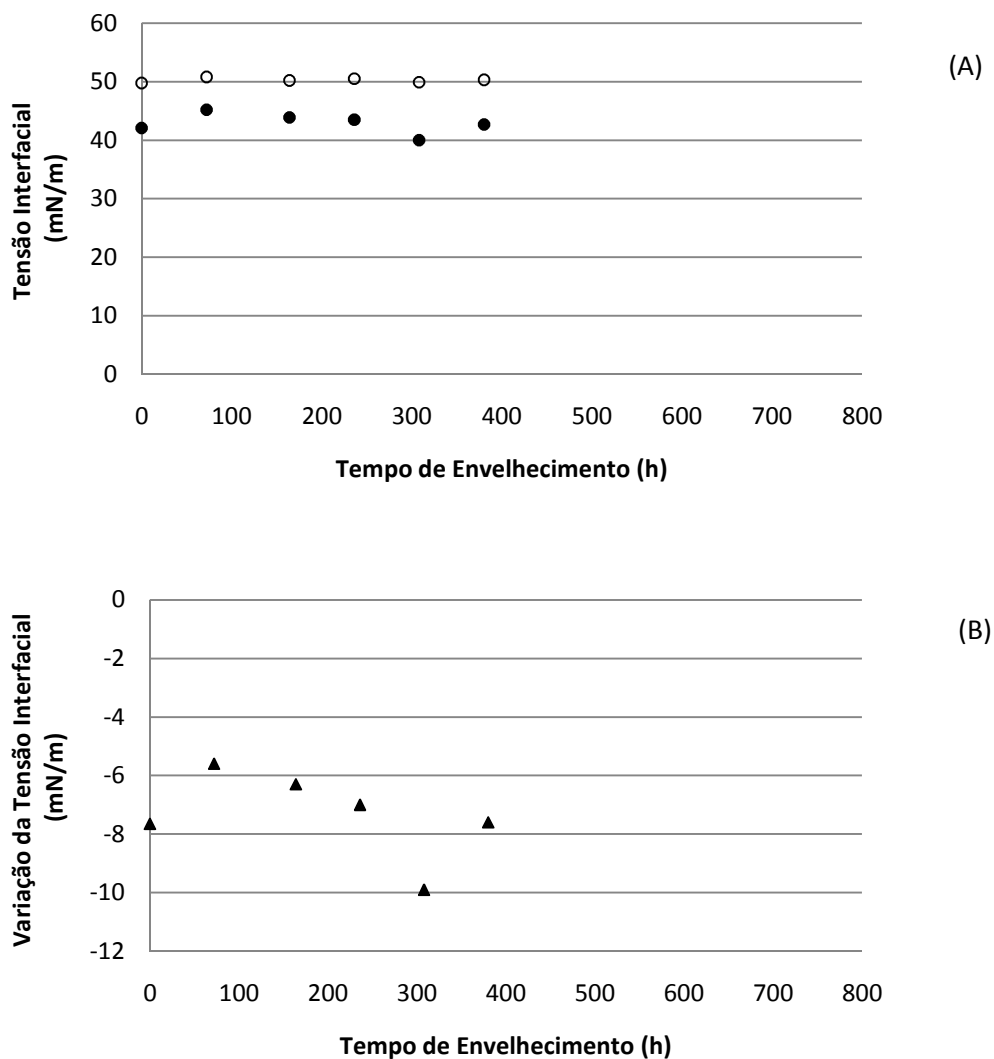


Figura 37. (A) Variação da tensão interfacial em função do tempo de envelhecimento, a 100 °C, do óleo isolante na presença da borracha nitrílica: (▲) OMI; e na ausência da borracha nitrílica: (△) OMI. (B) Diferença da tensão interfacial das amostras em relação ao branco.

4.7. DISCUSSÃO SOBRE VALORES LIMITES ACEITÁVEIS PARA O ENSAIO DE COMPATIBILIDADE COM ÓLEO VEGETAL ISOLANTE

Baseado em todos os ensaios realizados neste estudo foi possível propor os seguintes valores limites para o OVI da prova em branco em relação ao óleo original (óleo tal qual recebido):

- Fator de Perdas Dielétricas a 90°C: aumento máximo de 0,2%
- Índice de Neutralização: aumento máximo de 0,01 mg KOH.(g óleo)⁻¹
- Viscosidade a 40°C: aumento máximo de 0,3 cSt

Se o envelhecimento do óleo da prova em branco exceder algum dos limites propostos anteriormente, o óleo é suspeito para utilização como fluido isolante. Além dos parâmetros avaliados neste estudo, sugere-se o monitoramento da cor e da rigidez dielétrica do óleo.

Nas Tabelas 16 e 17 estão apresentados os resultados obtidos para as variações entre o óleo ensaiado na presença do material e a prova em branco para o índice de neutralização e a viscosidade. A variação máxima observada para o índice de neutralização foi de 0,02 mg KOH.(g óleo)⁻¹. Esse mesmo valor é referenciado na norma ABNT NBR 14274 para inferir se o material testado é compatível ou não com óleo mineral isolante. A variação máxima observada para viscosidade foi de 0,24 cSt (Tabela 16), que está dentro do erro experimental do método. A viscosidade não é parâmetro para inferir sobre a compatibilidade de um material com óleo mineral isolante. De uma forma

geral, as variações observadas no índice de neutralização e na viscosidade para os diferentes materiais testados não são significativas e, portanto, não foi possível inferir, baseado nestes ensaios, se um determinado material é compatível ou incompatível com o óleo vegetal isolante sob investigação.

O único parâmetro dos OVIs testados que apresentou variação após os ensaios de compatibilidade com os diferentes materiais foi o fator de perdas dielétricas a 90 °C (Tabela 18). Se for considerado o valor limite para o fator de perdas dielétricas estipulado na norma de compatibilidade para o óleo mineral isolante (ABNT NBR 14274), que é igual a 0,5%, apenas o papel e o aço silício podem ser considerados compatíveis com os óleos vegetais isolantes testados.

TABELA 16. Variação do índice de neutralização. Valor limite para esse parâmetro na ABNT NBR 14274: **aumento de 0,02 mg KOH.g óleo⁻¹.**

MATERIAL TESTE	Variação do índice de neutralização (mg KOH/g óleo) para os OVIs:	
	Evirotemp FR3	Biovolt A
Papel	0,01	0
Aço silício	0,01	0
Tinta	0	0
Fluorsilicone	0,01	0
Nitrílica	0,02	0
Bolsa	0	0

TABELA 17. Variação da viscosidade. Não há valor limite para esse parâmetro na ABNT NBR 14274.

MATERIAL TESTE	Variação da viscosidade (cSt) para os OVIs:	
	Envirotemp FR3	Biovolt A
Papel	0,11	-0,10
Aço silício	-0,19	-0,13
Tinta	-0,20	-0,10
Fluorsilicone	0	-0,07
Nitrílica	0,01	0,24
Bolsa	0	0,03

TABELA 18. Variação do fator de perdas dielétricas a 90°C. Valor limite para esse parâmetro na ABNT NBR 14274: **aumento de 0,5%.**

MATERIAL TESTE	Variação do fator de perdas dielétricas a 90 °C para os OVIs:	
	Envirotemp FR3	Biovolt A
Papel	-0,08	0,48
Aço silício	-0,14	0,03
Tinta	0,87	1,48
Fluorsilicone	5,19	4,71
Nitrílica	0,90	1,47
Bolsa	2,75	0,23

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

1. Considerando as variações máximas indicadas na norma ABNT NBR 14274, os materiais que indicaram compatibilidade com o OMI e os OVIs foram aço silício e papel Kraft isolante.
2. Dos parâmetros analisados (viscosidade, índice de neutralização, perdas dielétricas), o parâmetro que apresentou a maior variação nos óleos vegetais isolantes após os testes de compatibilidade foi o fator de perdas dielétricas.
3. Foi possível propor valores limites para a viscosidade a 40 °C, o índice de neutralização e o fator de perdas dielétricas a 90 °C para a prova em branco do óleo vegetal isolante:
 - Fator de Perdas Dielétricas a 90°C: aumento máximo de 0,2%
 - Índice de Neutralização: aumento máximo de 0,02 mg KOH.(g óleo)⁻¹
 - Viscosidade a 40°C: aumento máximo de 0,3 cSt
4. As variações máximas observadas para a viscosidade e o índice de neutralização para o óleo vegetal isolante testado na presença do material e

a prova em branco foram de 0,24 cSt e 0,02 mg KOH.(g óleo)⁻¹, respectivamente.

5. No caso da viscosidade, em havendo uma variação superior a 0,3 cSt a possibilidade de entrada de oxigênio no frasco de realização do ensaio de compatibilidade com óleo vegetal isolante deverá ser investigada.
6. O intervalo de tempo de 164 horas é adequado para realização do ensaio de compatibilidade de óleo vegetal isolante com materiais internos do transformador.
7. Ensaio com maior número e tipos diferentes de borrachas devem ser realizados em conjunto com outras técnicas de caracterização para definir um valor limite para o fator de perdas dielétricas para o ensaio de compatibilidade de óleos vegetais isolantes com materiais internos do transformador.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando o prosseguimento dos estudos a respeito da utilização de OVIs em equipamento elétricos, recomenda-se a efetivação das seguintes pesquisas:

1. Avaliação do efeito da temperatura e de outros tipos de borrachas na compatibilidade de materiais internos de transformadores com OVI.
2. Avaliação do desempenho dos materiais internos durante a operação de um transformador isolado com OVI.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10441. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos de petróleo - Líquidos transparentes e opacos - Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica.** 2007.

ABNT NBR 10504. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **OMI - Determinação da estabilidade à oxidação.** 1988.

ABNT NBR 10505. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **OMI - Determinação de enxofre corrosivo.** 2006.

ABNT NBR 10576. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - Diretrizes para supervisão e manutenção.** 2006.

ABNT NBR 10710/B. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Líquido isolante elétrico - Determinação do teor de água.** 2006.

ABNT NBR 11341. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.** 2004.

ABNT NBR 11349. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produto de petróleo - Determinação do ponto de fluidez.** 2005.

ABNT NBR 12133. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Líquidos isolantes elétricos - Determinação de fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica).** 1991.

ABNT NBR 12134 A. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
OMI - Determinação do teor de 2,6-di-terciário-butil paracresol. 1991.

ABNT NBR 13882/B. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
Líquidos isolantes elétricos - Determinação do teor de bifenilas policloradas (PCB). 2005.

ABNT NBR 14248. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
Produtos de petróleo - Determinação do número de acidez e de basicidade - Método do indicador. 2004.

ABNT NBR 14483. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
Produtos de petróleo - Determinação da cor - Método do colorímetro ASTM. 2005.

ABNT NBR 15422-06. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
OVI para equipamentos elétricos – Especificação. 2006.

ABNT NBR 5779. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
Óleos minerais isolantes - Determinação qualitativa de cloretos e sulfatos inorgânicos. 1989.

ABNT NBR 6234. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
Óleo-água - Determinação de tensão interfacial. 1965.

ABNT NBR 6869. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**
Líquidos isolantes elétricos - Determinação da rigidez dielétrica (eletrodos de disco). 1989.

ABNT NBR 7148. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Petróleo e produtos de petróleo - Determinação da massa específica, densidade relativa e °API - Método do densímetro . 2001.**

ABNT NBR 8148. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Papéis e papelões celulósicos, novos e envelhecidos, para fins elétricos - Medida do grau de polimerização viscosimétrico médio - Método de ensaio. 2000.**

ABNT NBR IEC 60156. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Líquidos isolantes - Determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial - Método de ensaio. 2004.**

ANP. **AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução nº 36, de 5 de dezembro de 2008. Especificações dos óleos minerais isolantes tipo A e tipo B, de origem nacional ou importada, comercializados em todo o território nacional, consoante às disposições contidas no Regulamento Técnico ANP nº 4/2008, parte integrante desta Resolução. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petro/legis_qualidade.asp> Acesso em: 05 abr. 2010.**

ASTM D2140. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for carbon-type composition of insulating oils petroleum origin. 2003.**

ASTM D2141. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Method of test for Adhesion ratio of polyethylene film. 1980.**

ASTM D-3300. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Under Impulse Conditions.** 1994.

ASTM D-6871. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus.** 2003.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL. Final Decision to Certify Hazardous Waste Environmental Technologies, 2003. Disponível em http://www.dtsc.ca.gov/TechnologyDevelopment/TechCert/upload/SPPTD_PN_Cooper_Final.pdf e acessado em 15 de março de 2010.

CIGRÉ DO BRASIL. **COMITÊ NACIONAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** Relatório técnico D1-01-002/05 - **Enxofre corrosivo em OMI.** Grupo de Trabalho D1-01- Líquidos Isolantes, outubro, 2005, 14 p.

CIGRÉ DO BRASIL. **COMITÊ NACIONAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** Atualização do Relatório técnico D1-01-002/05 **Enxofre corrosivo em OMI.** Grupo de Trabalho D1-01-Líquidos Isolantes, dez, 2006, 5p.

CIGRÉ INTERNACIONAL. **INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS.** Relatório técnico final - **Copper sulphide in transformer insulation.** Grupo de trabalho WG A2-32, Brochura 378, 2009, 35 p.

CLAIBORNE, C. C.; CHERRY, D. B. - **A status update on the use of natural ester (vegetable oil) dielectric fluids in transformers.** Anais do 74th Doble International Client Conference, Boston, MA, 2006.

CLARK, F. M. **Insulating materials for design and engineering practice.** New York: John Wiley and Sons, 1962, 393 p.

GRANATO, R.; LEVY, N.; TULIO, L. - **Apostila de OMI.** LACTEC, 2001, 25 p.

IEEE - **INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.** C57.147™. **Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers,** 2008, 31p.

LEWAND, L. R. - **Natural ester dielectric liquids.** Chemist's Perspective, Neta World, 2004.

LIPSHTEIN, R. A.; SHAKHNOVICH, M. I. **Transformer oil.** 2. ed. Jerusalem, Israel: 1970. 275p.

MAGEE, Nathan. **Chemical Interaction of Materials and Electrical Insulation Systems in End Use Products.** Eltek International Laboratories, 2008.

MARTINS, M. A. G. – **Será o óleo vegetal um possível substituto do óleo mineral para transformadores?** Revista Ciência & Tecnologia, Vol.20, N° 3/4, 2008.

MILASH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1984. 354 p.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais.** São Paulo: Varela Editora e Livraria Ltda, 1998. 150 p.

NYNÄS NAPHTHENICS AB. **Transformer oil handbook**. 1 ed., Sweden: Linderoths in Vingåker, 2004. 223 p.

RAAP, J. L. K, McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G.A., LUKSICH, J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid**. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. Atlanta, nov, 2001. 5p.

RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G. A., LUKSICH, J. **Aging of Kraft paper in natural ester dielectric fluid. Proceedings of 14th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)**. Austria, jul, 173-177, 2002.

RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., LUKSICH, J. **Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper**. 15th International conference on dielectric liquids, Coimbra, Portugal, Jun, 2005.

ROLLAND, N. **Explosões e incêndios em transformadores: método de avaliação de custos, benefício financeiro do transformer protector**. Copyright©SERGI. 2004. 9p.

TULIO, L. **Estudo do envelhecimento acelerado de OVI em escala laboratorial**. Curitiba, 2008. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante – PRODETEC) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao OMI**. Curitiba, 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

WILHELM, H. M. - **Resultados de pesquisas recentes sobre os efeitos de óleos isolantes vegetais em transformadores.** Anais do WORKSHOP de OVI do CEPEL, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

WILHELM, H. M., GRANATO, R. C., TULIO, BATISTA, D. A., STOCCO, G. B., SABEC, D., OLIVEIRA, J., UHREN, W., JASINSKI, R., NUNO G. ADONIS, N. G., JÚNIOR, S. B. G. **Desempenho de OVI frente ao envelhecimento acelerado.** Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica a ser realizado em Outubro de 2007.

WILHELM, H. M., GRANATO, R. C., TULIO, L., STOCCO, G. B., RAVAGLIO M. A., BATISTA, D. A., MATTOSO, M., TRINDADE, E. M., UHREN, W., JÚNIOR, S. B. G., ADONIS, N. G. **Aspectos relacionados com a utilização de OVI no Brasil.** Anais do IV International Workshop on Power Transformer (IV WORKSPOT). Abril 2006, 9p.

WILHELM, H. M.; STOCCO, G. B. - **Determinação da Estabilidade à Oxidação de OVIs pelo Método Condutivimétrico.** Relatório Técnico apresentado no Cigré, 2007, 6 p.

WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. – **Produção e uso de OVIs no setor elétrico.** Revista Brasil Engenharia, 2009, p. 120-124.

WILSON, A. C. M. **Insulating liquids: their uses manufacture and properties.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1980. 221p.

ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. - **Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo**

mineral. Revista: Controle & Automação. Vol. 16, N. 3, Julho, Agosto e Setembro de 2005.