

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

THAYSE HELENA PINHEIRO

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE BORRACHAS
NBR E EPDM SUBMETIDAS A DIFERENTES MEIOS DE EXPOSIÇÃO
PROVENIENTES DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

Joinville

2020

THAYSE HELENA PINHEIRO

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE BORRACHAS NBR E EPDM
SUBMETIDAS A DIFERENTES MEIOS DE EXPOSIÇÃO PROVENIENTES DA
INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Naval do Centro
Tecnológico de Joinville da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Gabriel Benedet Dutra

Joinville

2020

THAYSE HELENA PINHEIRO

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE BORRACHAS NBR E EPDM
SUBMETIDAS A DIFERENTES MEIOS DE EXPOSIÇÃO PROVENIENTES DA
INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 01 de dezembro de 2020.

Banca Examinadora:

Dr. Gabriel Benedet Dutra
Orientador/Presidente

Dr. Claudimir Antônio Carminatti
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Kleber Vieira da Paiva
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha querida avó Erna.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela força em momentos difíceis e a minha família, especialmente a minha mãe Trisiane e ao meu pai Antenor, que me deram amor e carinho durante toda a minha vida, assim como princípios e educação para me desenvolver como pessoa.

Agradeço também ao meu irmão Thiago, por partilhar desse zelo comigo e ao meu avô Pinheiro, por ser meu exemplo de honra e superação.

Sou grata ao meu orientador, Professor Gabriel, que me incentivou e encorajou durante essa caminhada, transmitindo seus conhecimentos para a concretização desse trabalho.

Aos meus colegas de laboratório, Elias, Mateus e Pedro, que me apoiaram durante esse projeto e foram solícitos e pacientes.

Ao meu coordenador de curso, Professor Calil, por todos os conselhos e instruções durante a minha graduação.

A minha irmã de coração, Isadora, por dividir comigo risos e cuidados, propiciando a mim um lar acolhedor.

Aos meus companheiros de estudos, Rafaela, Bárbara, Thálita, Suzane, Ana Luiza, Filipe e Milena, que me instigaram persistência e determinação para alcançar meus objetivos de maneira mais agradável possível.

A família Bohemios(as), por ser responsável pelos momentos mais incríveis da minha faculdade, conhecendo outro patamar de amor a um time e crescendo com aprendizados através de vice após vice.

Agradeço em especial aos amigos João Lucas, Gustavo, Pedro Henrique, Lucas, Isadora, Gabriela, Magali e Sheron pela convivência e parceria inigualável.

E aos meus amigos mais antigos e duradouros dessa empreitada, Matheus, Carlos Eduardo, Gabriel, Aníbal, Arion, Eduardo, Felipe e as maravilhosas Maria Eduarda, Bruna, Samanta, Nathalia, Carolina e Caroline por serem meu porto seguro e o discernimento de minhas ações.

“Que todos os nossos esforços estejam sempre focados no desafio à impossibilidade. Todas as grandes conquistas humanas vieram daquilo que parecia impossível.” Charles Chaplin.

RESUMO

Com a finalidade de compreender o impacto das condições de serviço pertinentes na indústria petroquímica em borrachas, tais como gaxetas e vedações, neste trabalho investigou-se o comportamento mecânico de borrachas NBR e EPDM em contato com diferentes meios de exposição e temperaturas por determinados períodos de imersão. Visto que, quando estão em operação, os elastômeros estão sujeitos a interações com diferentes fluidos a altas temperaturas, degradando o material e prejudicando sua capacidade de vedação, podendo ocorrer falhas e até mesmo danificar o equipamento em que os mesmos estão sendo empregados. Com a premissa de determinar a deterioração em NBR e EPDM sob influência do meio de exposição, foram mensuradas propriedades mecânicas como dureza e alterações de massa e volume, antes e após a imersão química em água destilada, óleo IRM 903 e expostas ao ar, todos a temperatura ambiente (24 °C), após sucessivos períodos de imersão (24, 72, 168, 336 e 504 h). Posteriormente a análise de dureza e ganhos de massa e volume, uma análise superficial foi realizada para complementar o efeito das propriedades físicas na superfície do material. Analogamente, o mesmo procedimento foi executado para compreender o envelhecimento térmico em borrachas NBR expostas ao ar e óleo IRM 903 a 100 °C. Ao analisar borrachas NBR expostas a temperatura ambiente percebe-se que não houve mudanças significativas nas propriedades estudadas, com variações de até 2 % de massa e volume e oscilações de 2 unidades Shore A. Comprovando que a mesma tem uma boa resistência a água, ar e óleo a temperatura ambiente. Entretanto ao submeter CP's de NBR em temperaturas mais altas, fica evidente o efeito do óleo no elastômero, causando um inchamento. Visto que há um aumento progressivo de massa e volume em relação ao tempo, atingindo variações de 13,3 % e 12,8 % respectivamente. Porém, a dureza das amostras expostas ao óleo a 100 °C não apresentaram alterações expressivas, variando até 2 unidades Shore A. Uma suposição é que o óleo tenha atuado como uma barreira protetora, reduzindo assim a concentração de oxigênio na superfície. Em relação as borrachas EPDM, é perceptível o efeito agressivo do óleo, com uma dominação das reações de cisão de cadeia em sua estrutura molecular. Causando um inchamento progressivo em relação ao tempo, com variações de até 54,4 % e 40,5 % de massa e volume respectivamente. Por consequência, há uma queda na dureza, caindo de 80 para 67 Shore A. Sendo assim, compreende-se que os elastômeros NBR possui uma alta resistência ao óleo, porém tal particularidade é afetada em temperaturas elevadas. Em contrapartida, a borracha EPDM se apresenta muito sensível ao óleo já em temperaturas ambientes.

Palavras-chave: Elastômeros. Borrachas. Imersão química. Envelhecimento térmico. Meios de exposição.

ABSTRACT

In order to understand the impact of the relevant service conditions of the petrochemical industry on rubbers, such as seals and gaskets, this work investigated the mechanical behavior of NBR and EPDM rubbers in contact with different exposure media and temperatures for certain periods of immersion. Since when they are in service, elastomers are submitted to interactions with different fluids at high temperatures. Which can reduce its sealing capacity and cause failures. With the premise of determining deterioration in NBR and EPDM under the influence of the exposure medium, mechanical properties were measured before and after chemical immersion. Therefore, the hardness, variation in mass and volume, in contact with air, distilled water, IRM 903 oil, were measured after 24, 72, 168, 336 and 504 h at room temperature (24 °C). After the analysis of hardness and mass and volume gains, a superficial analysis was performed to complement the effect of physical properties on the material surface. Similarly, the same procedure was performed to understand thermal aging in NBR rubbers exposed to air and IRM 903 oil at 100 °C. When analyzing NBR exposed to room temperature it is perceived that there were no significant changes in the properties studied, with variations of up to 2 % of mass and volume and oscillations of 2 Shore A units. Proving that it has good resistance to water, air and oil at room temperature. However, when submitting NBR CP's at higher temperatures, the effect of the oil on the elastomer becomes evident, causing a swelling. Since there is a progressive increase in mass and volume over time, reaching variations of 13.3% and 12.8 %, respectively. However, the hardness of the samples exposed to the oil at 100°C did not change significantly, varying up to 2 Shore A units. One assumption is that the oil acted as a protective barrier, thus reducing the oxygen concentration at the surface. In relation to EPDM rubbers, the aggressive effect on the oil is noticeable, with a domination of the chain scission reactions in its molecular structure. Causing a progressive swelling in relation to time, with variations of up to 54.4 % and 40.5 % mass and volume, respectively. As a result, there is a drop in hardness, falling from 80 to 67 Shore A. Thus, it is understood that NBR elastomers have a high resistance to oil, but this particularity is affected at high temperatures. On the other hand, EPDM rubber is very sensitive to oil already at ambient temperatures.

Keywords: Elastomers. Rubbers. Chemical immersion. Thermal aging. Exposure medium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura química do monômero NBR.	21
Figura 2 – Estrutura química do monômero EPDM.	22
Figura 3 – Esboço esquemático dos CP's.	26
Figura 4 – Exemplo de CP (a) e modelo de gaxeta (b)..	27
Figura 5 – Estufas de simulação de temperatura 24 °C (a) e 100 °C (b).	28
Figura 6 – Repouso das amostras com (ar) e sem (b) o contato ao meio de exposição 28	28
Figura 7 – Balança digital.	29
Figura 8 – Medições da massa em contato com o ar (a) e água destilada (b).	31
Figura 9 – Máquina universal (a) e durômetro (b).	32
Figura 10 – Exposição ao meio em NBR variação de massa 35	35
Figura 11 – Exposição ao meio em NBR variação de volume com limite (a) e sem limite (b) ISO 23936-2.	36
Figura 12 – Exposição ao meio em NBR dureza com limite (a) e sem limite (b) ISO 23936-2.	37
Figura 13 – Análise superficial NBR a 24 °C na água por 72 h (a) e 504 h (b) e no óleo por 72 h (c) 504 h (d).	38
Figura 14 – Exposição ao meio em EPDM variação de massa com (a) e sem (b) o contato com óleo.	39
Figura 15 – Exposição ao meio em EPDM variação de volume com (a) e sem (b) o contato com óleo.	40
Figura 16 – Exposição ao meio em EPDM dureza com limite (a) e sem (b) limite ISO 23936-2.	42
Figura 17 – Análise superficial EPDM a 24 °C na água por 72 h (a) e 504 h (b) e no óleo por 72 h (c) e 504 h (d) 43	43
Figura 18 – Temperatura NBR variação de massa com (a) e sem (b) o contato com óleo a 100 °C.	44
Figura 19 – Temperatura NBR variação de volume com (a) e sem (b) o contato com óleo a 100 °C.	45
Figura 20 – Temperatura NBR dureza com (a) e sem (b) limite ISO 23936-2.	46
Figura 21 – Análise superficial NBR a 100 °C em óleo por 72 h (a) e 504 h (b).	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos materiais elastômeros utilizados.	22
Quadro 2 – Condições de ensaio.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados medições em NBR ao ar a 24 °C.....	53
Tabela 2 – Resultados medições em EPDM ao ar a 24 °C.....	53
Tabela 3 – Resultados medições em NBR ao ar a 100 °C.....	53
Tabela 4 – Resultados medições em NBR em contato com água a 24 °C	54
Tabela 5 – Resultados medições em NBR em contato com óleo a 24 °C	55
Tabela 6 – Resultados medições em EPDM em contato com água a 24 °C.	56
Tabela 7 – Resultados medições em EPDM em contato com óleo a 24 °C.	57
Tabela 8 – Resultados medições em NBR em contato com óleo a 100 °C.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACN – Acrinotrilo

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP's – Corpos de Provas

EPDM – Ethylene Propylene Diene Methylene Rubber

h – Horas

ISO – International Organization for Standardization

min – Minutos

mL – Mililitros

mm – Milímetros

N – Newton

mm/min – Milímetros por minutos

NB – Natural Rubber

NBR – Nitrile Butadiene Rubber

kN – Quilonewton

s – Segundos

LISTA DE SÍMBOLOS

l_i	Comprimento após imersão
l_0	Comprimento inicial
ρ_b	Densidade borracha
H	Dureza
$^{\circ}C$	Graus Celsius
h	Horas
m	Massa
m_i	Massa do corpo de prova após imersão
m_0	Massa inicial do corpo de prova
min	Minutos
s	Segundos
Δl	Varição percentual de comprimento
Δt	Varição percentual de espessura
Δw	Varição percentual de largura
Δm	Varição percentual de massa
ΔV	Varição percentual de volume
V	Volume
V_i	Volume do corpo de prova após imersão
V_0	Volume inicial do corpo de prova

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.1.	OBJETIVOS	17
1.1.1.	Objetivo Geral.....	17
1.1.2.	Objetivos Específicos	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1.	ELASTÔMEROS	19
2.1.1.	NBR.....	20
2.1.2.	EPDM.....	21
2.2.	MEIOS DE EXPOSIÇÃO	23
2.3.	ESTADO DA ARTE	23
3.	METODOLOGIA.....	25
3.1.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1.1.	Obtenção dos Corpos de Prova	26
3.1.2.	Caracterização das Condições de Ensaio	27
3.2.	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES.....	28
3.2.1.	Determinação da Variação de Massa.....	29
3.2.2.	Determinação da Variação de Volume	30
3.2.3.	Determinação das Variações de Dimensões	31
3.2.4.	Determinação da Dureza.....	31
3.3.	ANÁLISE SUPERFICIAL	33
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1.	INFLUÊNCIA DO MEIO DE EXPOSIÇÃO.....	34
4.1.1.	Influência do Meio de Exposição em NBR	35
4.1.2.	Influência do Meio de Exposição em EPDM.....	39
4.2.	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	43
5.	CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A – RESULTADOS MEDIÇÕES EM CONTATO COM O AR	53
	APÊNDICE B – RESULTADOS MEDIÇÕES NBR ÁGUA A 24 ° C	54
	APÊNDICE C – RESULTADOS MEDIÇÕES NBR ÓLEO A 24 ° C	55
	APÊNDICE D – RESULTADOS MEDIÇÕES EPDM ÁGUA A 24 ° C.....	56
	APÊNDICE E - RESULTADOS MEDIÇÕES EPDM ÓLEO A 24 ° C.....	57

APÊNDICE F – RESULTADOS MEDIÇÕES NBR ÓLEO A 100 ° C.....58

1. INTRODUÇÃO

A borracha é um material singular pois exibe tanto propriedades elásticas quanto viscosas quando sofre deformações. (KUJUNDZIC, 2019). Tais particularidades a torna de grande interesse em muitas aplicações de engenharia, devido também a sua compressibilidade, alongamento, recuperabilidade, entre outras características. (WOO et al., 2011).

De acordo com Kujundzic (2019), atualmente existe um grande número de polímeros com características semelhantes as borrachas, denominado elastômeros. Segundo Samsuri (2010), os elastômeros são polímeros que se destacam na fabricação de inúmeros produtos, tais como, pneus, correias de transmissão, tubos, mangueiras, absorvedores de choque, revestimentos de cilindros, vedantes, entre outros.

Entretanto, Mark (2005) cita que para melhorar as propriedades dos elastômeros, a composição orgânica pode ser alterada introduzindo diferentes grupos funcionais, obtendo diversos tipos de borrachas, tais como a borracha nitrílica butadieno (NBR) e a borracha etileno propileno dieno metileno (EPDM).

A formulação da borracha começa pela seleção do próprio elastômero, onde as propriedades intrínsecas e únicas de cada elastômero, como: resistência ao óleo de uma NBR (Nitrile Butadiene Rubber), a resistência à degradação por ozônio da EPDM (Ethylene Propylene Diene Methylene) ou a alta resiliência da borracha natural (NR ou Natural Rubber), entre outras, determinam o material mais adequado para cada aplicação. (ALVES, 2005).

Na indústria petroquímica, a NBR tem sido amplamente empregada devido ao grande potencial para borrachas de vedação, já que tem um baixo custo, excelente resistência ao óleo e graxas, baixa taxa de abrasão e boa processabilidade. Entretanto, é muito sensível ao seu ambiente de operação devido à insaturação do butadieno na sua cadeia molecular principal, resultando em uma agressiva influência da temperatura, umidade ou carga mecânica na durabilidade do material. (LIU et al., 2016).

A EPDM também se destaca nesse setor, a mesma consiste em uma estrutura principal saturada, apenas na cadeia lateral tem insaturações. Visto isso, fornece excelente resistência química a condições climáticas, baixa constante dielétrica e usabilidade em baixas

temperaturas. A EPDM é utilizada em outras aplicações, tais como, em áreas de construção, isolamento elétrico e fabricação de automóveis. (ZIRNSTEIN et al., 2019).

Com a finalidade de tornar os elastômeros em um material com maior elasticidade e dureza, é realizado o processo de vulcanização, o qual é um processo de reticulação que reduz a viscosidade devido ao encurtamento das cadeias moleculares e introduz ligações cruzadas através da formação de pontes de enxofre para torna-las mais elásticas, por intermédio de uma reação química na presença de calor e aditivos. (SAMSURI, 2010).

Segundo Mansilla et al. (2015), quando um elastômero vulcanizado é imerso em um determinado fluido, as moléculas deste agente penetram em sua cadeia orgânica alterando suas dimensões, resultado em um inchamento. O grau da dilatação depende da familiaridade entre os materiais e a densidade das ligações cruzadas.

No setor petroquímico, algumas borrachas de vedação são submetidas ao contato com diferentes fluidos a elevadas temperaturas, causando em alguns casos a falha e a deterioração do material em serviço. Sendo assim, faz-se necessário uma investigação sistemática do comportamento deste material em condições controladas. Por conseguinte, neste estudo serão realizados testes experimentais para correlacionar a dureza, variação em volume, em massa e dimensões geométricas da borracha antes e após o contato com o ar, água destilada e óleo IRM 903, a temperatura ambiente e a 100 °C. Com isto, pretende-se investigar as propriedades físicas de diferentes tipos de borracha em contato com diferentes fluidos.

1.1. OBJETIVOS

Para compreender o comportamento mecânico de borrachas NBR e EPDM ao entrarem em contato com diferentes meios de exposição e temperaturas, no presente trabalho propõem-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o efeito de fluidos nas dimensões do material e na propriedade mecânica dureza Shore A em borrachas NBR e EPDM, de modo a estabelecer a relevância das condições de operação nas características físicas do material.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Expor as amostras a meios de exposição, como ar, água destilada e óleo IRM 903, submetendo a condições definidas de tempo e temperatura;
- Determinar a deterioração resultante nas propriedades mecânicas, como dureza, e alterações de massa e volume perante a influência de ar e certos líquidos;
- Estudar as principais diferenças das borrachas NBR e EPDM no processo de imersão química em contato com fluidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em conformidade com o objetivo geral definido, para interpretar o caráter das borrachas NBR e EPDM sujeitas a ação de degradação química imposta por determinados meios de exposição, este capítulo aborda, sobre elastômeros, caracterização química e mecânica de borrachas, particularidades dos elastômeros estudados, tipos de meios de exposição e aplicações de borrachas de vedação na indústria petroquímica, em trabalhos retratados na literatura.

2.1. ELASTÔMEROS

De acordo com a ISO 1382-Rubber vocabular, um elastômero é um material que ao ser submetido a uma deformação por tensão, retorna rapidamente ao seu formato e dimensões originais após a liberação da carga de tensão. O elastômero é considerado um polímero sintético, tendo muitas partículas pequenas unidas quimicamente por ligações covalente para formar uma longa cadeia molecular. (SAMSURI, 2010).

Os elastômeros apresentam boa flexibilidade, boa resistência a água e boa elasticidade após serem vulcanizados. Segundo Mark (2005), a vulcanização é um processo que aumenta a força retrátil e reduz a quantidade de deformação permanente após a remoção de uma força previamente aplicada, aumentando assim a elasticidade do material e diminuindo a plasticidade. Outra propriedade é a forte resistência a ácidos inorgânicos, por esse motivo, muitos revestimentos de tanques e tubos químicos são feitos de elastômeros com a finalidade de proteger contra o ataque de produtos químicos corrosivos.

Outra característica relevante é a resistência ao inchamento, isto é, penetração de moléculas em sua cadeia orgânica que alteram suas dimensões, a qual resulta em um inchaço. De acordo com Samsuri (2010), a resistência de inchamento em relação aos hidrocarbonetos, tais como petróleo, depende da extensão da polaridade do elastômero. Quanto mais grupos polares ligados as suas moléculas, melhor será a resistência ao aumento de volume.

Entretanto, os elastômeros são sujeitos à degradação devido a variáveis como oxidação, rachaduras por ataque de ozônio, absorção de líquidos, envelhecimento térmico, entre outros. A deterioração desse material é muito complexa já que são expostas ao oxigênio, ozônio, calor e deformações mecânicas em suas condições de operação, assim como o contato de solvente, óleo, combustíveis e outros agentes. (SAMSURI, 2010).

A borracha natural é um elastômero que tem sua matéria prima extraída da árvore seringueira. (TANASI et al, 2019). De acordo com Samsuri (2010), as borrachas sintéticas são produzidas através de reações de polimerização de compostos diênicos, sendo possível alcançar diferentes propriedades de borracha dependendo do monômero utilizado em sua formulação.

Grison (2010) cita que as melhores propriedades mecânicas da borracha são obtidas por uma menor aditivação de componentes. Quanto maior a quantidade de agentes incorporados em sua estrutura molecular, menor a sua resistência, resiliência, flexibilidade e elasticidade. Como a borracha sofre degradação sob o efeito da luz e do calor, são introduzidas, agentes de proteção, antioxidantes e antiozonantes, que garantem longa durabilidade.

As borrachas tem uma vasta aplicação, de maneira geral são utilizadas em pneus, correias de transmissão, tubos, mangueiras, por outro lado as borrachas de uso geral muitas vezes não suportam altas temperaturas e especificações de resistência ao óleo. (SAMSURI, 2010). Outras borrachas são fabricadas com o intuito de atender a requisitos específicos, como flexibilidade a baixas e altas temperaturas de serviço e resistência ao inchamento aos óleos, as quais se destacam a borracha nitrílica (NBR) e a borracha etileno propileno dieno metileno (EPDM).

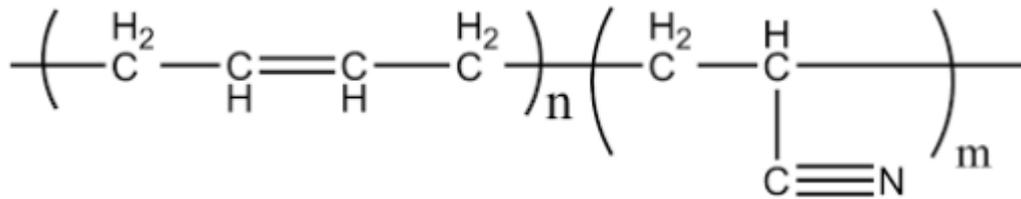
2.1.1. NBR

A Borracha Nitrílica (NBR) é um copolímero de acrilonitrilo butadieno muito utilizado na indústria petrolífera, principalmente em anéis de vedação. A NBR é composta por um sistema complexo com uma matriz de borracha, aditivos, ativadores e plastificantes, os quais influenciam na durabilidade e envelhecimento térmico da mesma. (LIU et al., 2018).

O acrilonitrilo (ACN) introduz a este elastômero uma ótima resistência ao óleo, quanto maior for a proporção de ACN em sua composição química, menor será o inchamento da borracha quando exposta a certos fluidos, entretanto, o aumento da resistência ao óleo procede em um aumento na viscosidade. A borracha nitrílica também é caracterizada por uma boa resistência a baixas e altas temperaturas, resistência a fadiga dinâmica e uma baixa permeabilidade ao gás. (NBR..., 2013).

A Figura 1 apresenta a estrutura química do monômero de NBR, onde pode ser visto ligações duplas em sua cadeia principal, a tornando mais exposta a oxidação. O oxigênio pode acrescentar composições reativas nas ligações duplas, as quais se decompõem causando a degradação da rede polimérica, diminuindo assim sua resistência a reações termo-oxidativas. (KUJUNDZIC, 2019).

Figura 1 – Estrutura química do monômero NBR.



Fonte: Kujundzic (2019).

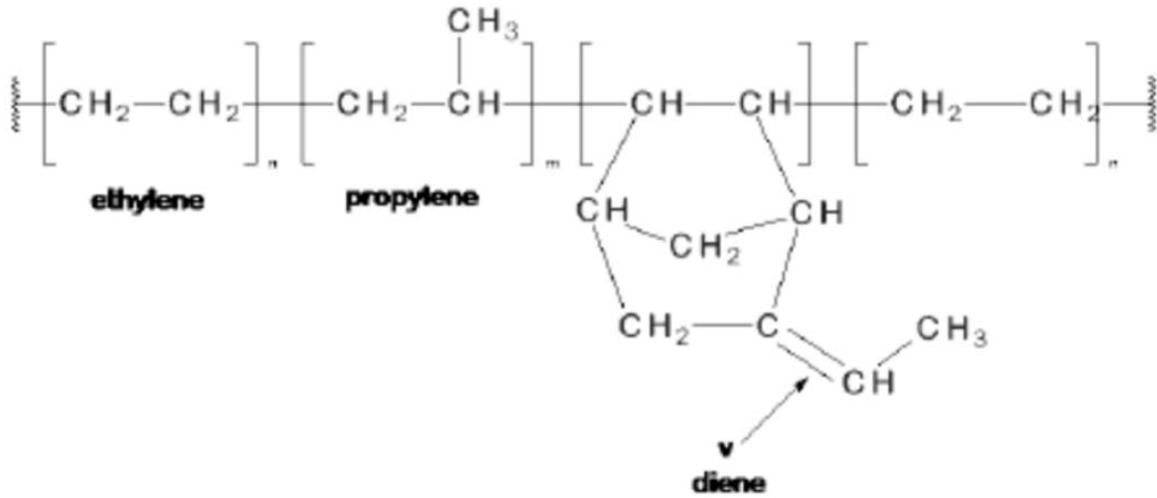
A NBR tem muito contato com óleos lubrificantes e combustíveis, devido a sua ampla utilização na indústria petroquímica, os quais influenciam significativamente no envelhecimento térmico da mesma. Durante o processo de envelhecimento, a NBR geralmente se torna dura e quebradiça devido à oxidação e das reações de reticulação, já que os átomos de carbono adjacente às ligações duplas são facilmente atacados durante essas reações. (LIU et al., 2018).

2.1.2. EPDM

A borracha de monômero de etileno propileno dieno (EPDM) é umas das borrachas sintéticas que mais vem se desenvolvendo. Possui excelente elasticidade, flexibilidade em baixa temperatura, boa propriedade de isolamento elétrico e alta resistência ao calor, oxigênio, ozônio e irradiação devido a sua estrutura composta por uma cadeia principal com hidrocarbonetos saturados. (LI et al., 2020).

A Figura 2 apresenta a estrutura polimérica do monômero EPDM. De acordo com Kujundzic (2019), uma das grandes vantagens desses elastômeros é que a ligação dupla na molécula de dieno não está localizada na cadeia principal e sim em um grupo lateral, sendo assim, a mesma apresenta uma boa resistência a reações termo-oxidativas.

Figura 2 – Estrutura química do monômero EPDM.



Fonte: Kujundzic (2019).

Devido as suas particularidades, a EPDM é amplamente utilizada em produtos industriais, tais como gaxetas à prova d'água, anéis de vedação. Entretanto durante a operação de vedação, a borracha não é submetida apenas ao efeito de envelhecimento por oxidação térmica, mas também sofre impacto de esforços mecânicos, que leva a deterioração da estrutura física, podendo eventualmente perder sua função de vedação, podendo resultar em vazamentos de gás e líquidos. (KUJUNDZIC, 2019).

O Quadro 1 apresenta as características das duas borrachas estudadas referenciadas na norma ISO 23936-2 (2011) - Petroleum, petrochemical and natural gas industries.

Quadro 1 – Características dos materiais elastômeros utilizados.

Tipos de Elastômeros	Máxima Temperatura Nominal no Ar (°C)	Características
NBR	120	Nitrilo, altamente insaturado, bom material de vedação de uso geral, sensível ao envelhecimento e variação do conteúdo de acrinitrilo para afetar o desempenho a baixas temperaturas e inchamento ao óleo.
EPDM	150	Boa em água e vapor, pobre em hidrocarbonetos

Fonte: Adaptado de ISO 23936-2 (2011).

2.2. MEIOS DE EXPOSIÇÃO

De acordo com a ISO 23936-2 Petroleum, petrochemical and natural gas industries - non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production, fluido significa um ambiente representado por um gás, líquido ou uma mistura de ambos. No presente trabalho foram selecionados três fluidos, água destilada, óleo IRM 903 e o ar, os quais serão denominados como meios de exposição.

A água destilada é o resultado de um processo de destilação, isto é, a mesma torna-se mais pura do que as águas em geral comercializadas. Porém não é recomendada para consumo humano e sim ao uso industrial, já que pode apresentar um baixo teor de sais e matéria orgânica. (ECYCLE, 2020).

O óleo padrão ASTM IRM 903 é um óleo de referência da norma ASTM D471-06 – Standard test method for rubber property- effect of liquids. Tal norma descreve procedimentos de elastômeros e os líquidos de teste padrão utilizados, sendo eles, óleos IRM 901, IRM 902 e IRM 903, todos óleos minerais com diferentes concentrações de parafinas e aromáticos.

2.3. ESTADO DA ARTE

Com o passar do tempo se torna mais comum o estudo sobre comportamento de elastômeros sob determinadas condições. Salehi et al. (2019) investigou o comportamento dos elastômeros, tais como NBR e EPDM, em água salina e vapores corrosivos, através de ensaios de envelhecimento de até 7 dias em temperaturas de 48 e 82 °C.

Salehi et al. (2019) cita que em seus resultados a dureza tende a cair quanto maior for o período de imersão, entretanto é observado um pequeno aumento na dureza com o aumento da temperatura. E em relação ao inchamento das borrachas, isto, é aumento de volume, há um pico de inchamento em três dias, mas depois há um declínio gradual de inchamento, isto ocorre devido a cisão de cadeias poliméricas. Conclui-se que o aumento da temperatura diminui o inchamento de volume, ou seja, a dureza do elastômero é inversamente proporcional ao inchamento.

Alves (2005) realizou ensaios de envelhecimento em borrachas NBR em diferentes meios, períodos de imersão e condições de temperatura e pressão, a fim de identificar a deterioração de propriedades como dureza e volume. Ele observou que em temperaturas de 80 e 100 °C há uma perda gradual da capacidade da borracha de suportar compressão, mantendo

ainda a recuperabilidade elástica. Porém, em temperaturas mais altas (125 e 150 °C) houve uma degradação avançada do material.

De acordo com Alves (2005), os CP's em contato com óleo, não especificado pelo autor, apresentaram uma queda de dureza já nas primeiras horas de testes, onde é perceptível uma grande influência de altas temperaturas na dureza, esta redução deve-se provavelmente ao fato de ocorrer uma penetração do óleo na estrutura molecular no material. O mesmo apresentou uma dureza maior em sua superfície de contato do que em seu interior, isto ocorre devido uma rápida oxidação superficial que pode variar conforme a disposição do corpo durante o envelhecimento.

No estudo de Alves (2005), percebe-se também, uma perda progressiva de volume ao longo do tempo, sendo que nas temperaturas elevadas este efeito é acentuado mesmo em tempos curtos de imersão (24 h). Esse fato se deve provavelmente a uma extração de componentes voláteis no material, devido a sensibilidade dos mesmo a temperatura mais altas, isto é, quanto maior a temperatura mais rapidamente ocorre a extração desses componentes o que implica em uma rápida perda de volume e procede de uma redução mais direcionada a própria degradação do material. Dessa forma, os resultados apresentam que a temperatura e pressão são os fatores que mais influenciam no processo de envelhecimento dessas borrachas.

Farfán-Cabrera et al. (2018) estudou as alterações de propriedades físicas de elastômeros, dentro deles EPDM, através de exposição a óleo diesel e lubrificante por 670 h a 24 °C. Onde as variações das características físicas estão diretamente associadas ao fenômeno de inchamento, que decorre da absorção do solvente e do relaxamento das cadeias poliméricas. A quantidade de absorção de solvente pode ser presenciada em mudanças de massa e volume, enquanto o relaxamento das cadeias poliméricas resulta em alterações das propriedades mecânicas como resistência a tração e dureza.

Apesar dos mais variados estudos sobre o comportamento de elastômero, cada condição de temperatura ou meio de exposição afeta diretamente nas propriedades mecânicas e físicas de borracha, prejudicando sua funcionalidade tanto em vedações direcionada aos setores petroquímicos quanto nas demais áreas de engenharia. Por isso, é de extrema importância se aprofundar sobre o comportamento de elastômero, mediante ao contato com diferentes tipos de óleos e temperaturas.

3. METODOLOGIA

Este capítulo aborda a metodologia utilizada para compreender o comportamento de borrachas NBR e EPDM, através de medições de massa, volume, dureza e dimensões antes e após a exposição de meios específicos, sendo esse processo denominado imersão química.

3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento em questão é baseado na norma ISO 1817:2015 Determination of the effect of liquids. Referente a borrachas vulcanizadas e averiguação da resistência de elastômeros sob ação de líquidos, pela medição das propriedades das borrachas antes e após imersão em líquidos referenciados, tais como derivados de petróleo, solventes orgânicos e reagentes químicos.

Como a taxa de penetração de fluidos nas borrachas depende da temperatura, tipo de borracha e líquido de imersão, a ISO 1817:2015 recomenda ensaios após sucessivos períodos de imersão contínua, a fim de analisar a influência do tempo nas propriedades mecânicas das borrachas. Visto isso, foram determinados cenários distintos, com as seguintes variáveis:

- 2 elastômeros (NBR e EPDM);
- 3 meios de exposição (ar, água destilada e óleo IRM 903);
- 2 temperaturas (24 e 100 °C);
- 5 períodos de imersão (24, 72, 168, 336 e 504 h).

A 24 °C foram avaliadas todos elastômeros e meios de exposição. Porém, a 100 °C apenas será estudada a NBR em contato com o ar e óleo, pois a EPDM é muito sensível ao óleo. (KUJUNDZIC, 2019). A água por ter o ponto de ebulição próximo a 100 °C, também foi descartada dos ensaios de alta temperatura. Resultando em 8 condições de ensaios diferentes, repetidos sucessivamente em cada período de imersão. O Quadro 2 apresenta tais condições.

Quadro 2 – Condições de ensaio.

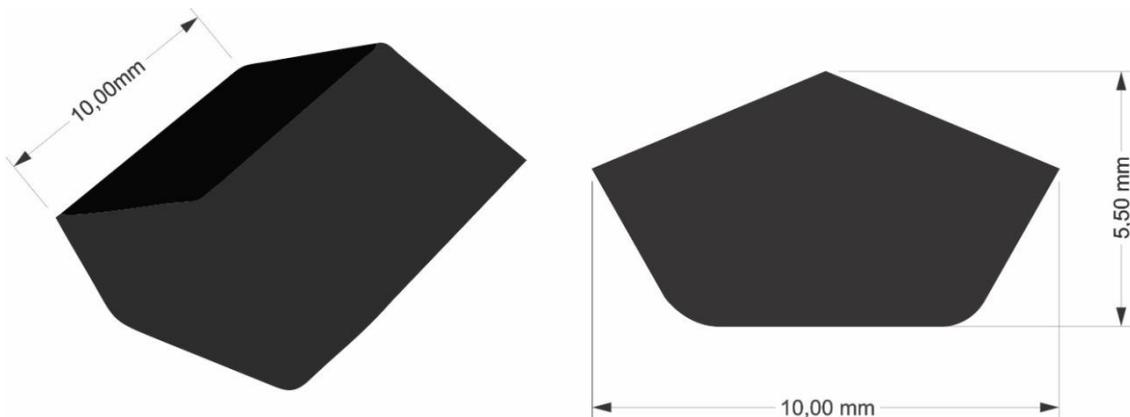
Condições	Material	Meio de exposição	Temperatura
1° Condição	NBR	Ar	24°C
2° Condição		Água Destilada	24°C
3° Condição		Óleo IRM 903	24°C
4° Condição		Ar	100°C
5° Condição		Óleo IRM 903	100 C
6° Condição	EPDM	Ar	24°C
7° Condição		Água Destilada	24°C
8° Condição		Óleo IRM 903	24°C

Fonte: Autora (2020).

3.1.1. Obtenção dos Corpos de Prova

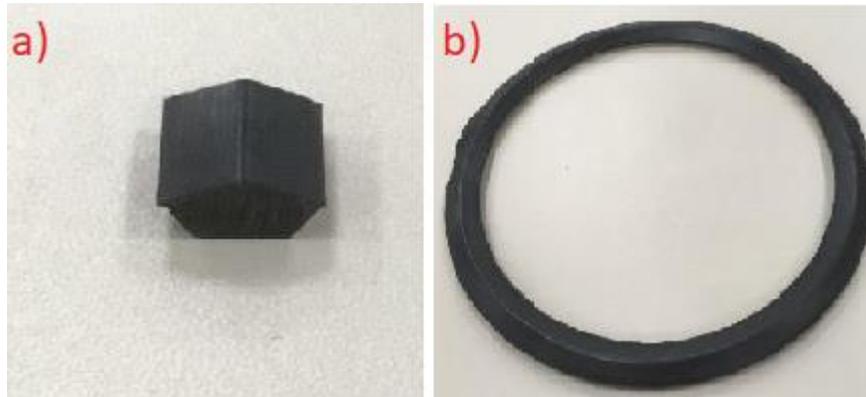
Primeiramente, as amostras foram confeccionadas a partir de gaxetas comerciais elastoméricas de NBR e EPDM, ambas de formato pentagonal, com aproximadamente 5,5 *mm* de altura da base ao pico e 10 *mm* de largura entre as extremidades. De acordo com o fabricante das gaxetas, a EPDM é o modelo Keltan 4260 DE e a NBR é o modelo Nancar 1052. As gaxetas foram cortadas com o auxílio de um estilete, em comprimentos com cerca de 10 *mm*. a Figura 3 apresenta um esboço esquemático dos corpos de prova (CP's) e a Figura 4 mostra um exemplo do CP (a) e o modelo da gaxeta (b) onde foram retirados os CP's.

Figura 3 - Esboço esquemático dos CP's.



Fonte: Autora (2020).

Figura 4 – Exemplo de CP (a) e modelo de gaxeta (b).



Fonte: Autora (2020).

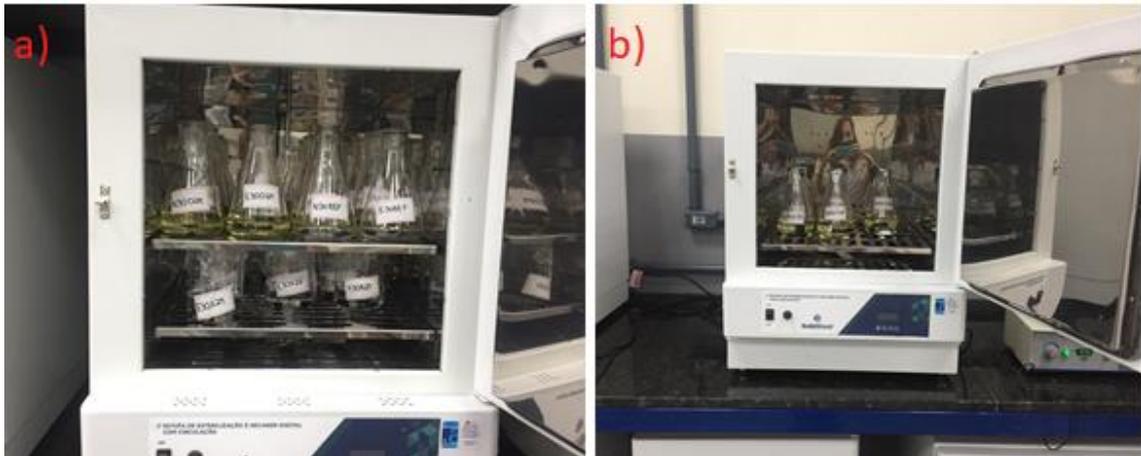
3.1.2. Caracterização das Condições de Ensaio

Como forma de caracterizar as condições de ensaios abordadas, foram utilizados recipientes com capacidade de 200 mL, o conteúdo do recipiente representa um meio de exposição, por conseguinte 100 mL de água destilada foi colocada nos recipientes que correspondem a uma condição de contato com água destilada. O mesmo ocorreu com as condições de exposição ao óleo IRM 903 e os recipientes vazios tratam-se das amostras com interação com o ar.

As amostras foram inseridas nos recipientes para a execução da imersão química. Para cada condição foram utilizadas triplicatas, portanto cada recipiente possui três amostras da borracha estudada, NBR ou EPDM.

Para a viabilização das condições de temperatura dos experimentos, se torna necessário o uso de estufas, onde possibilita simular condições controladas de temperatura e manter os CP's livres de impurezas do ar. Como duas temperaturas foram estudadas, duas estufas SolidSteel com resolução de 1 °C foram utilizadas, sendo assim os ensaios ocorreram simultaneamente. A Figura 5 apresenta as estufas simulando 24 °C e (a) 100 °C (b).

Figura 5 – Estufas de simulação de temperatura 24 °C (a) e 100 °C (b).



Fonte: Autora (2020).

3.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES

Antes de as amostras irem a estufa, houveram as medições de massa, volume, dureza e determinação das dimensões de largura, altura e comprimento. Em seguida, os CP's foram submetidos a imersão químicas, nos períodos propostos e após o seu término, as amostras foram retiradas da estufa e repousaram por 1 h a temperatura ambiente.

No período de repouso, os CP's descansaram por 30 min ainda em contato com o meio de exposição, posteriormente, ficaram mais 30 min sem o contato com o meio de exposição, retirando as amostras dos recipientes. A Figura 6 apresenta amostras passando pelo processo de repouso com (a) e sem (b) o contato ao meio de exposição.

Figura 6 – Repouso das amostras com (a) e sem (b) o contato ao meio de exposição.



Fonte: (Autora).

Com a finalidade de remover o excesso do líquido na superfície dos CP's, os mesmos foram secos com papel filtro. Seguidamente, iniciou-se as medições das propriedades após o processo de imersão.

3.2.1. Determinação da Variação de Massa

Para as medições das variações de massa e volume, é utilizada uma balança digital Prix, modelo PS600, resolução de 0,001 g, apresentada na Figura 7. Para a determinação da alteração de massa, é calculada a diferença percentual da massa após e antes da imersão, através da expressão 1.

$$\Delta m = \frac{m_i - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

Δm é a variação percentual de massa;

m_0 é a massa inicial do corpo de prova;

m_i é a massa do corpo de prova após imersão.

Figura 7 – Balança digital.



Fonte: Autora (2020).

3.2.2. Determinação da Variação de Volume

Para a determinação de variação de volume, baseia-se, no método de deslocamento de água validado pelo princípio de Arquimedes. Pelo princípio de Arquimedes, todo corpo, parcial ou totalmente submerso em um líquido, fica sujeito a uma força de empuxo do líquido, de direção vertical, de baixo para cima, e com intensidade igual ao peso do líquido deslocado. (MONTANHEIRO et al., 1990).

Ao colocar um corpo totalmente submerso em um líquido, nesse trabalho foi utilizada água destilada, o corpo apresenta uma massa em água que pode ser expressa em função da densidade do próprio material.

Portanto, com o auxílio da balança digital, os CP's são medidos em contato com o ar e posteriormente em contato com a água destilada. A balança fornece a densidade das amostras, através da equação 2, é possível determinar o volume através da massa e da densidade.

$$V = \frac{m}{\rho_b} \quad (2)$$

Onde:

V é o volume;

m é a massa;

ρ_b é a densidade da borracha.

Para a definição das propriedades em imersão química, a porcentagem de variação do volume das amostras (ΔV) submersa em líquidos é apresentada na expressão 3.

$$\Delta V = \frac{V_i - V_0}{V_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

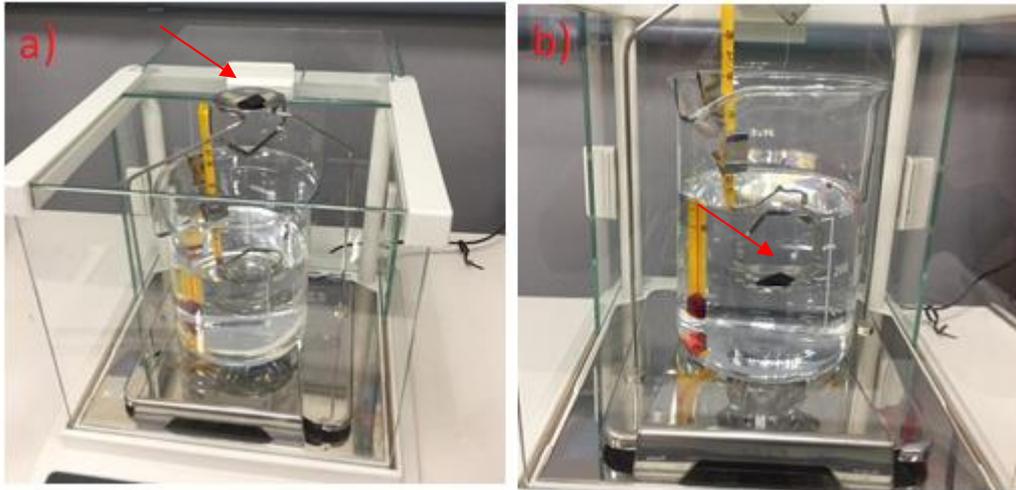
ΔV é a variação percentual de volume;

V_0 é o volume inicial do corpo de prova;

V_i é o volume corpo de prova após imersão.

A Figura 8 apresenta uma amostra sendo medida em contato com o ar (a) e água destilada (b).

Figura 8 – Medições da massa em contato com o ar (a) e água destilada (b).



Fonte: Autora (2020).

3.2.3. Determinação das Variações de Dimensões

A mensuração do comprimento das amostras é determinada com o auxílio de um micrômetro Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm. Mantido firmemente em um suporte rígido, para assim avaliar a porcentagem de variação do comprimento (Δl) apresentado na equação 4.

$$\Delta l = \frac{l_i - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

Δl é a variação percentual de comprimento;

l_0 é o comprimento inicial;

l_i é o comprimento após imersão.

De maneira similar, também são calculadas as variações na largura (Δw) e espessura (Δt) das amostras.

2.2.4. Determinação da Dureza

A determinação das alterações de dureza foi realizada de maneira automatizada, ao contrário das outras medições de propriedades, que foram feitas manualmente. Um durômetro

digital Shore Mitutoyo Tipo A, foi fixado em uma máquina universal de ensaios Instron com célula de carga de 30 kN. Permitindo estabelecer um padrão de força e deslocamento para ser imposto ao durômetro, a fim de determinar a dureza dos CP's. O procedimento foi realizado seguindo a norma ISO 7619-1:2010-Rubber, vulcanize or thermoplastic- determination of indentaion hardness.

A utilização da máquina foi uma alternativa para garantir o alinhamento do durômetro com a amostra e automatizar a carga aplicada. Assim, na parte superior foi utilizada uma garra tipo cunha para fixar o durômetro e na parte inferior um prato de compressão para posicionar a amostra.

Em um primeiro instante, testes preliminares foram realizados para definir o nível de força que seria utilizado, observando a intensidade necessária para que a base do durômetro encoste no topo da altura da amostra. Visto isso, conclui-se que com 15 N de força possibilitava o contato da base do equipamento com o topo da gaxeta. Dessa maneira, quando a base do durômetro toca na gaxeta, aplicando uma força de 15 N, a máquina universal mantém essa posição por 8 s. A Figura 9 apresenta a máquina universal utilizada (a) e o durômetro (b) fixado na mesma.

Figura 9 – Máquina universal (a) e durômetro (b).



Fonte: Autora (2020).

3.3. ANÁLISE SUPERFICIAL

Para complementar os resultados das propriedades físicas estudadas, foi realizada uma análise superficial. com a intuito de averiguar a porosidade superficial das amostras, a qual sua percepção é muito difícil ao olho nu.

Sendo assim, foi utilizado um estereoscópio Digilab 152T com uma escala de 1:10 de ampliação. As amostras foram medidas a partir do período de 72 h com a finalidade de comparar a degradação da superfície em relação ao próximo período de imersão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a apresentação bibliográfica dos principais conceitos envolvidos nesse trabalho, assim como o estado da arte e o desenvolvimento da metodologia, no presente capítulo serão exibidos os resultados dos ensaios realizados, dividindo os tópicos de maneira mais adequada para visualização dos resultados e elaboração das discussões.

Foram estudadas as variações de massa (Δm) e de volume (ΔV), dureza (H) e dimensões geométricas, sendo a última, alterações de comprimento, largura e altura. Porém, a análise das dimensões geométricas não será apresentada neste trabalho, pois os seus aspectos são visualizados em sua totalidade com a variação de volume. Os valores das medições podem ser vistos detalhadamente nos apêndices A ao F.

Os resultados serão divididos em dois tópicos; variações de massa, variações de volume e dureza sob influência do meio de exposição (4.1) e sob influência da temperatura (4.2), onde serão comparados os resultados obtidos com os conceitos já conhecidos na literatura. Para um melhor entendimento, ao final de cada tópico serão apresentadas imagens da porosidade superficial dos CP's.

4.1. INFLUÊNCIA DO MEIO DE EXPOSIÇÃO

Em uma primeira abordagem, será verificada a influência dos meios de exposição nos CP's de material NBR e EPDM. Os meios analisados foram o ar, água destilada e óleo IRM 903 a temperatura ambiente.

Para tornar a análise mais aplicável à indústria petroquímica, foram inseridos nos gráficos de variação de volume e dureza, os limites de aceitação impostos pela norma ISO 23936-2. A mesma se refere a elastômeros em operação ao entrarem em contato com meios relacionados para a produção de petróleo e gás.

Os critérios de aceitação foram estabelecidos como os intervalos mínimos e máximos aceitáveis para qualquer condição. A norma em questão não cita alguma limitação relacionada com a variação de massa. Os limites de variação de volume e dureza são apresentados a seguir:

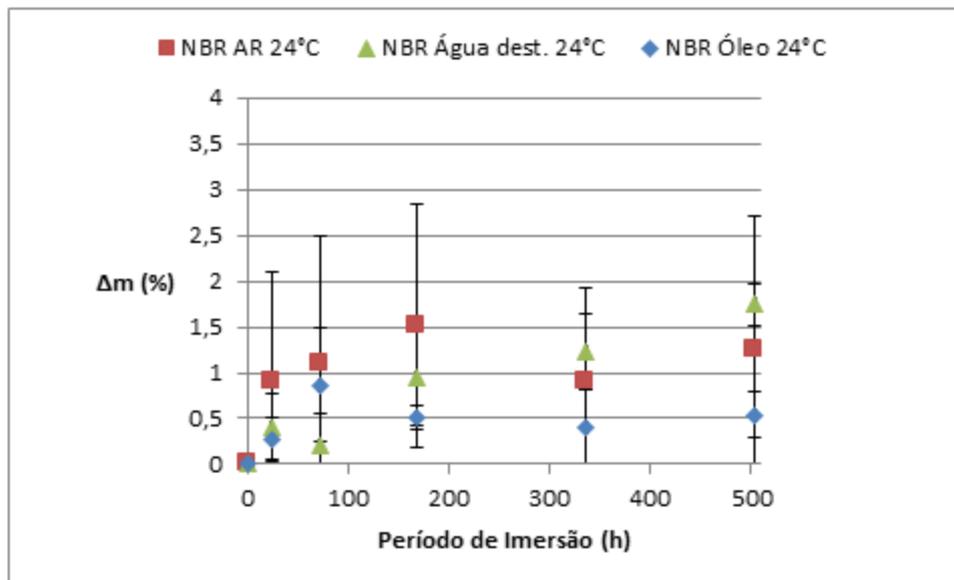
- Volume: variação de até 25% do volume original;
- Dureza: ganho máximo de até 10 unidades de dureza Shore A e perda máxima de até 20 unidades de dureza Shore A da dureza original.

4.1.1. Influência do Meio de Exposição em NBR

As amostras de NBR e EPDM serão avaliadas separadamente, primeiramente, será apurada a borracha NBR. As Figuras 10 e 11 exibem as variações de massa e volume para NBR, respectivamente. As mesmas refletem um percentual de ganho de massa e volume, assim como as outras Figuras que apresentam essas propriedades nos próximos tópicos.

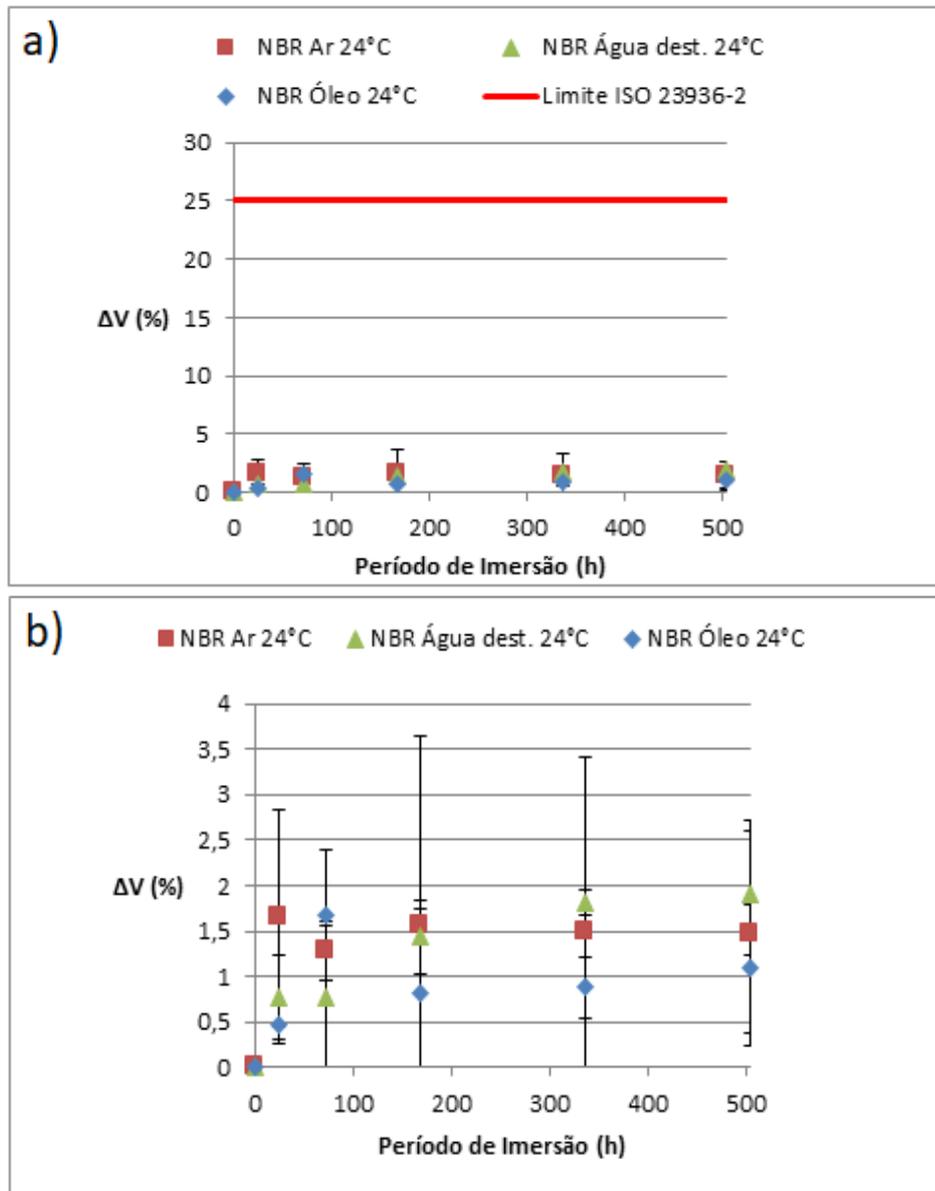
Para melhor visualização, o gráfico da Figura 11 será representado em duas escalas diferentes do eixo das ordenadas, para não prejudicar a resolução dos dados, o primeiro mostrando o limite ISO 23936-2 e o segundo não.

Figura 10 - Exposição ao meio em NBR variação de massa.



Fonte: Autora (2020).

Figura 11 – Exposição ao meio em NBR variação de volume com limite (a) e sem limite (b) ISO 23936-2.



Fonte: Autora (2020).

Analisando as Figuras 10 e 11, percebe-se variações pequenas de até 2 % da massa e volume originais, todas dentro do desvio padrão. As amostras expostas ao ar e a água apresentam uma variação maior em massa e volume, com exceção do período de 72 h.

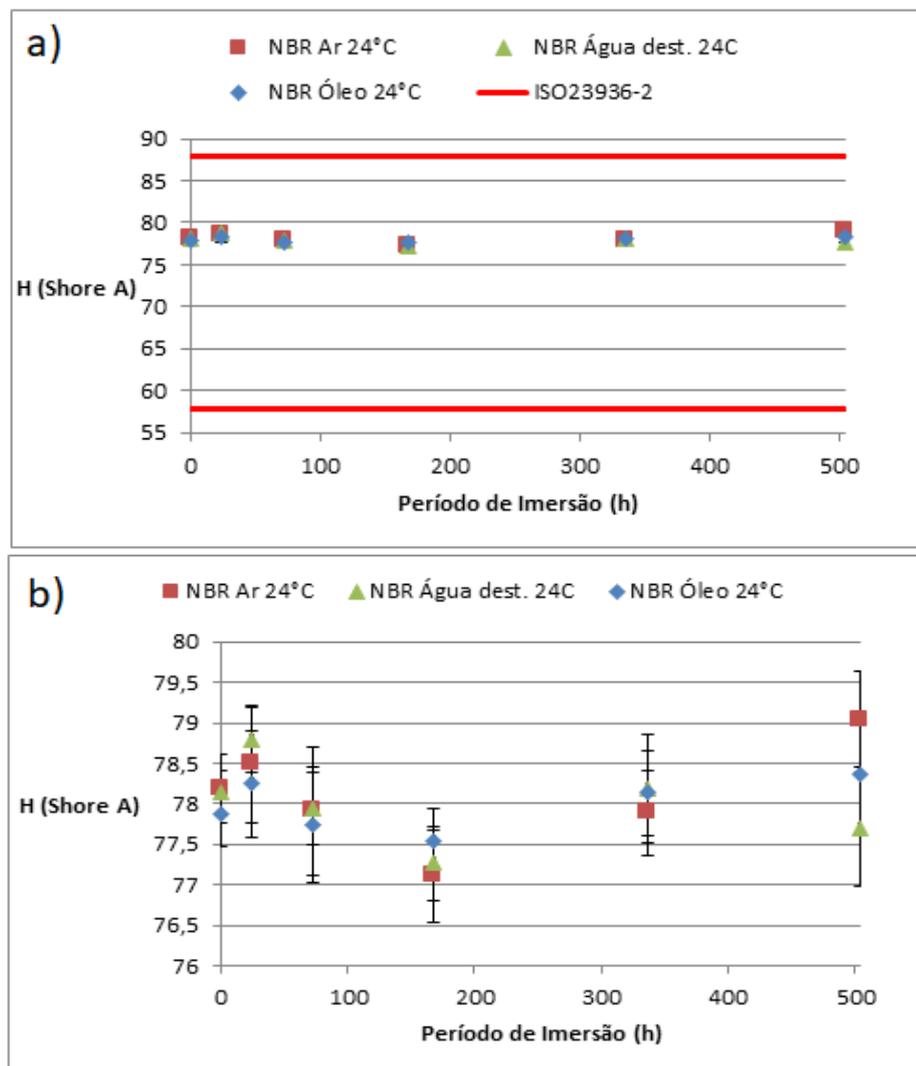
De acordo com Lou et al. (2018), o óleo pode contribuir para a extração de componentes, tanto de aditivos quanto monômeros residuais da borracha. Portanto, a extração do solvente causa inicialmente uma rápida perda de massa nas condições de temperatura e tempo investigadas. Visto isso, o ganho de massa é maior no ar e na água do que no óleo. Porém,

mesmo com a extração dos solventes, é indicando um aumento de massa dos CP's, provavelmente devido a uma entrada de água ou óleo nas cadeias poliméricas.

Nota se que as amostras em contato com o óleo tiveram uma tendência de aumento de volume em 72 h e a partir disso uma redução. De acordo com Kujundzic (2019), essa redução pode estar vinculada a uma mudança na estrutura do polímero devido a degradação, ou mesmo uma absorção inicial de óleo na superfície com uma posterior retirada de solventes na cadeia, implicando em uma queda de massa e volume em períodos mais longos.

Dando sequência análise de influência do meio, a Figura 12 apresenta as intensidades de dureza, dividindo em duas escalas, para apresentar o limite ISO 23936-2 na figura 12 (a) e averiguar melhor os resultados na figura 12 (b).

Figura 12 - Exposição ao meio em NBR dureza com limite (a) e sem limite (b) ISO 23936-2.



Fonte: Autora (2020).

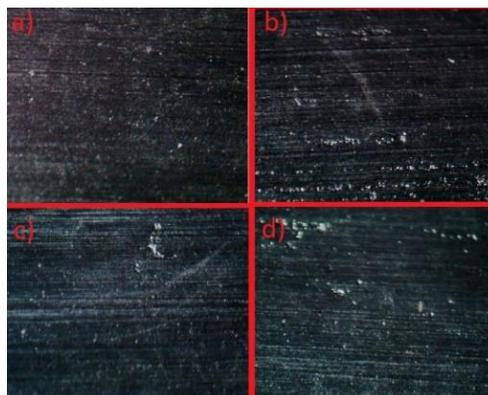
Analisando a Figura 12 (b) testemunha-se oscilações de dureza 77 a 79 Shore A. Constata-se, que os meios estudados não apresentaram um efeito agressivo na estrutura molecular de borrachas NBR, que reforça que a mesma possui boa resistência ao óleo, fato já mencionado na literatura. (ALVES, 2005). Além disso, as Figuras 11 (a) e 12 (a) mostram que todas as amostras investigadas de NBR a temperatura de 24 °C encontram-se dentro do limite previsto pela ISO 23936-2.

Ao observar as Figuras 11 (b) e 12 (b), percebe-se que as amostras em contato com a água apresentam uma tendência de maior magnitude (78,9) em 72 h, período o qual apresenta uma tendência de menor variação de volume (0,77 %) na mesma condição. Kujundzic (2019) cita que uma menor absorção do solvente na superfície, isto é, menor inchamento das amostras, implica em uma mobilidade limitada da estrutura molecular da borracha, devido a formação de ligações cruzadas em sua composição. Nesses pontos em que as ligações cruzadas são dominantes, há um aumento de dureza e fragilidade no material. Entretanto, não é possível afirmar que essa particularidade ocorreu nesse caso, pois os resultados estão dentro dos desvios padrões.

Repara-se na Figura 12 (b), uma ligeira tendência de aumento de dureza nos CP's de NBR a 24 °C, mais perceptível naqueles expostos ao ar em 504 h. Porém, devido as pequenas variações, impossibilita afirmar um comportamento da dureza em relação ao tempo de imersão e o meio de exposição.

Para finalizar a influência do meio nas borrachas NBR, a Figura 13 a seguir apresenta imagens da superfície das amostras em contato com a água por 72 h (a) e 504 h (b) assim como amostras expostas ao óleo em 72 h (c) e 504 h (d). Entretanto, nestas condições não são apresentadas modificações significativas na porosidade dos CP's.

Figura 13 – Análise superficial NBR a 24 °C na água por 72 h (a) e 504 h (b) e no óleo por 72 h (c) 504h (d).

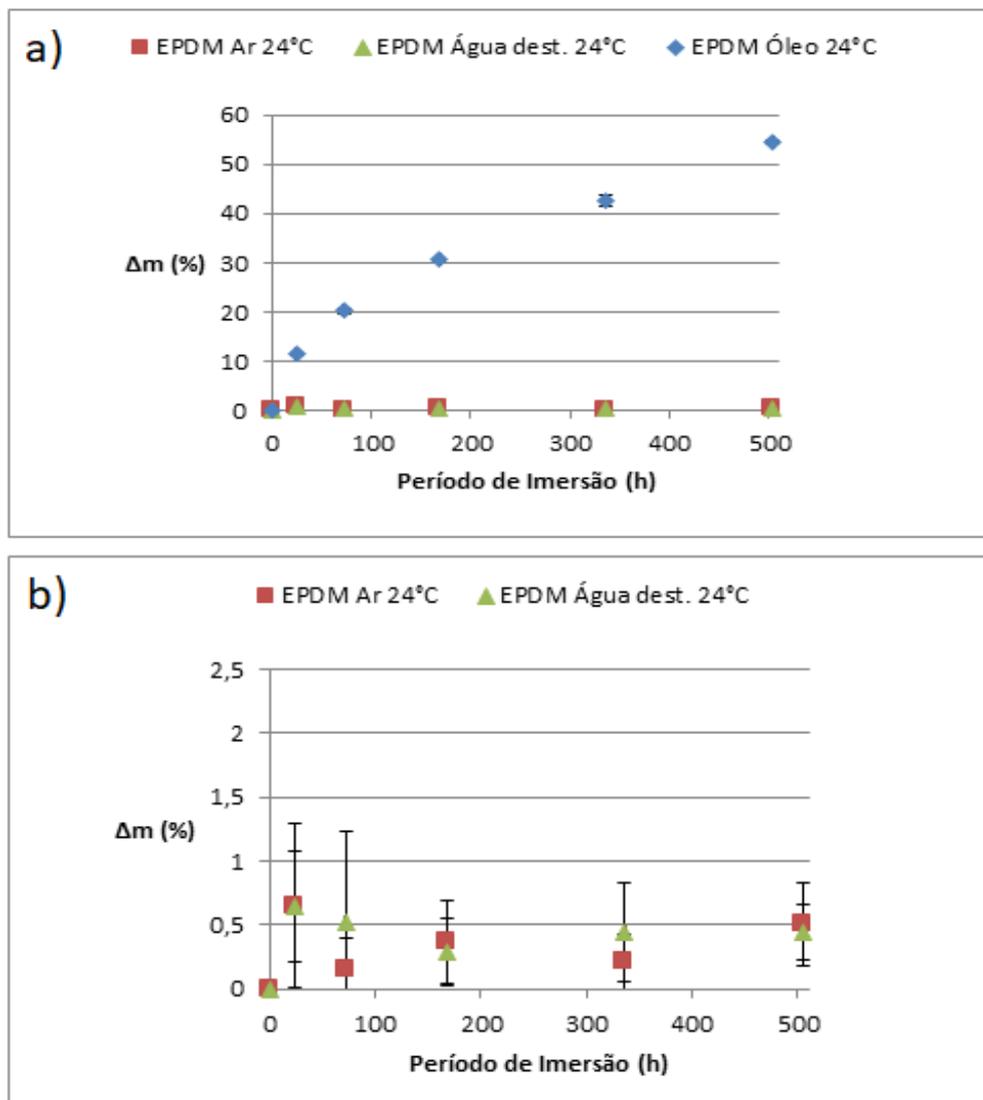


Fonte: Autora (2020).

4.1.2. Influência do Meio de Exposição em EPDM

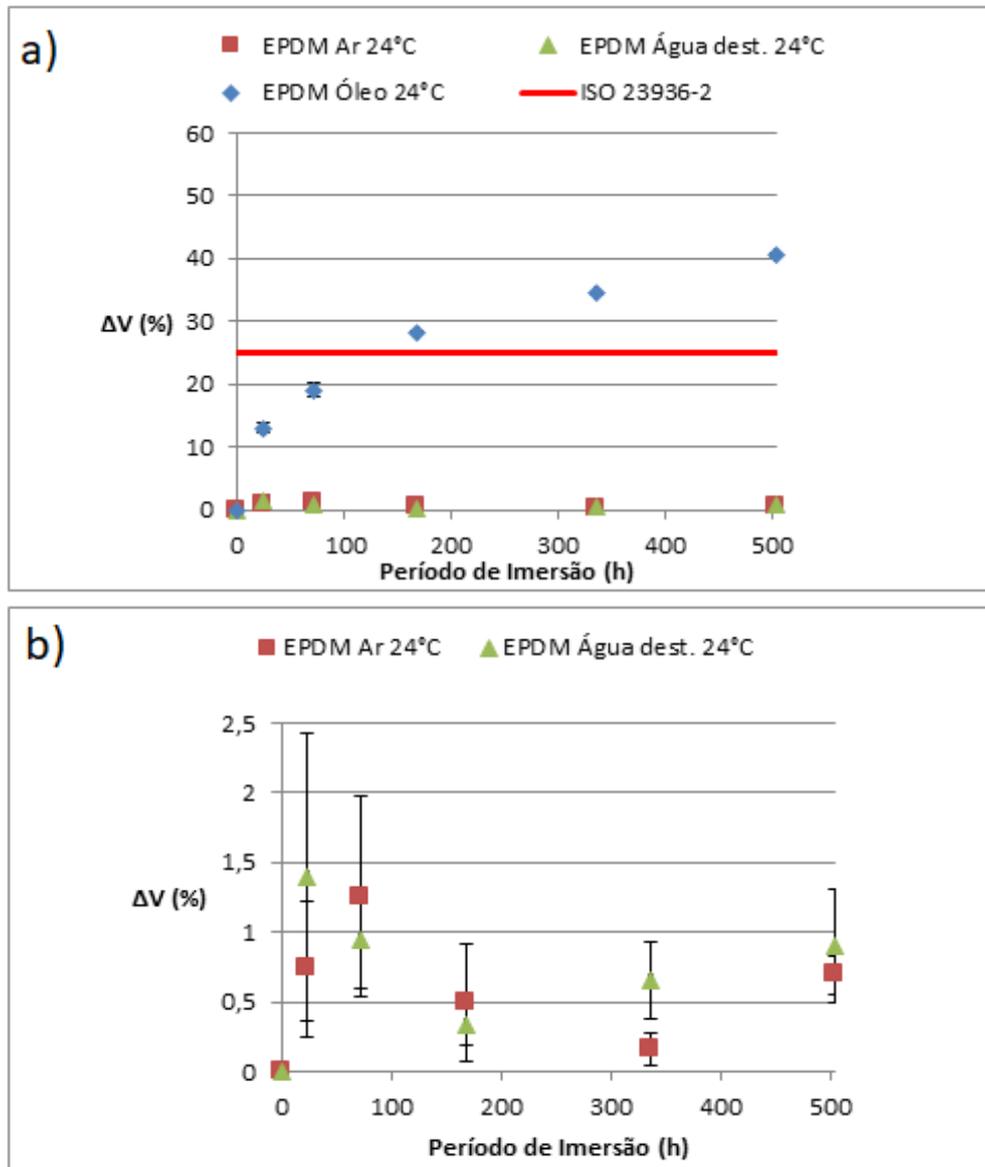
De maneira análoga a seção 4.1.1, nesse tópico será apresentado a influência do meio de exposição em borrachas EPDM. As Figuras 14 (a) e 15 (a) exibirão, respectivamente, as variações de massa e volume em todos os meios de exposição estudados e as Figuras 13 (b) e 14 (b) apenas os CP's em contato com o ar e água.

Figura 14 - Exposição ao meio em EPDM variação de massa com (a) e sem (b) o contato com óleo.



Fonte: Autora (2020)

Figura 15 - Exposição ao meio em EPDM variação de volume com (a) e sem (b) o contato com óleo.



Fonte: Autora (2020).

Após examinar as Figuras 14 (b) e 15 (b), percebe-se uma variação de massa e volume até 1,5 % do seu valor original, em CP's expostos ao ar e a água, porcentagem ligeiramente menor do que a das alterações de NBR quando expostas as mesmas condições, sendo que é conhecido em bibliografias que a EPDM apresenta uma boa resistência em água. (ISO 23936-2, 2011).

A tendência das curvas revela que um maior inchamento em água e ar, isto é, as maiores variações de volume, ocorre dentro das primeiras 72 h, depois há uma queda gradual até 336 h e volta a aumentar em 504 h. As Figuras 14 (b) e 15 (b) apresentam tendências similares, onde

as amostras expostas em água e ar tiveram um aumento nos primeiros períodos seguidos por uma queda e a partir disso um ligeiro aumento.

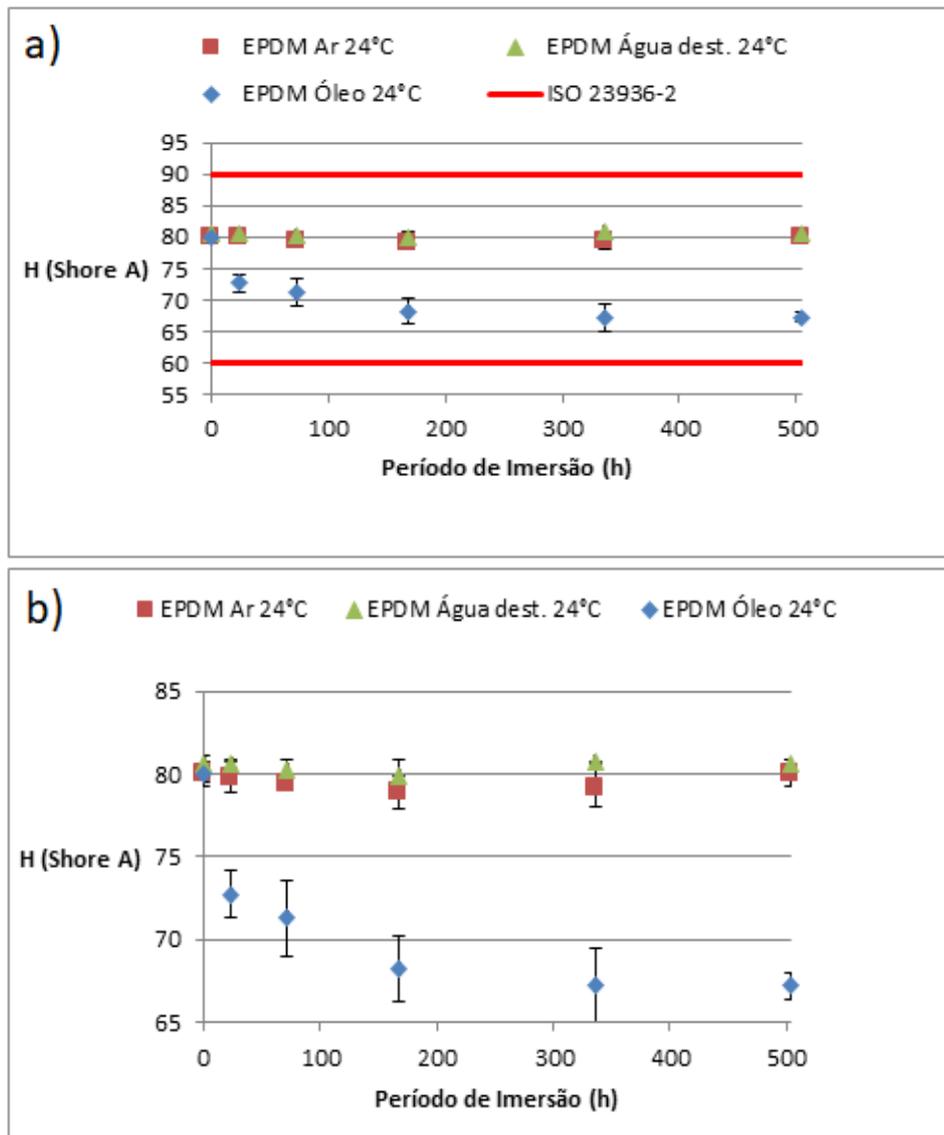
Esse comportamento é similar ao estudo de Salehi et al. (2019) em borrachas NBR e EPDM em contato com água salina e vapores corrosivos, onde o seu pico de inchamento ocorreu em três dias e depois há um declínio gradual de inchamento. Segundo o autor, isso ocorre devido a cisão de cadeias poliméricas, afirmando que o inchamento de volume é inversamente proporcional a dureza.

As Figuras 14 (a) e 15 (a) além de apresentar as mudanças em ar e água, também retratam as alterações em contato com o óleo, provavelmente ocorreu uma influência severa do óleo na composição química de EPDM, rompendo as cadeias poliméricas, promovendo o inchamento.

O comportamento destes gráficos apresenta uma tendência progressiva de inchamento, quanto maior for o período de imersão maior a degradação da borracha, com os picos de variação registrados em 504 h com uma porcentagem de variação de massa de 54,4 % e de volume 40,5 %. Sendo assim, é averiguado que a EPDM é muito sensível ao óleo, fato já esperado, pois segundo a ISO 23936-2 (2011) a mesma é pobre em contato com hidrocarbonetos. Percebe-se na figura 15 (a) que já em 168 h, a variação de volume ultrapassa o limite estabelecido por esta mesma norma.

Para finalizar o estudo da influência do meio de exposição, a Figura 16 demonstra o seu efeito em relação a dureza em EPDM. Para não afetar a resolução dos dados, o mesmo será retratado primeiramente apresentando o limite ISO 23936-2 (a) e expondo melhor os resultados (b).

Figura 16 - Exposição ao meio em EPDM dureza com (a) e sem (b) limite ISO 23936-2.



Fonte: Autora (2020).

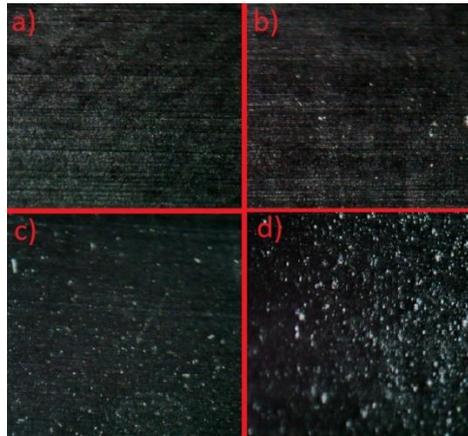
Investigando a Figura 16 (b), observa-se pequenas variações na dureza nas amostras em contato com o ar e água, com oscilações de 78 a 80 Shore A. Entretanto, as que tiveram em contato com o óleo, tiveram uma queda acentuada já em 24 h, reduzindo de 80 para 72 Shore A, a partir disso a dureza continua caindo, porém mais lentamente, até a queda máxima de 67 Shore A.

A redução de dureza mais rápida nas primeiras horas de teste, 24 h, deve se provavelmente ao fato de ocorrer uma penetração no óleo na estrutura do material. (ALVES, 2005). Também neste processo verifica-se que as reações de cisão de cadeia são dominantes, fato também observado no estudo de Salehi et al. (2019), onde o mesmo afirma que se a

temperatura se mantém constante, porém o período de imersão aumenta, tende a ter um crescimento das reações de cisão de cadeia.

Em sequência, a Figura 17 exibirá a análise superficial da borracha EPDM em contato com a água a 24 °C por um período de imersão de 72 h (a) e 504 h (b) e similarmente nas mesmas condições em contato com o óleo, (c) e (d) respectivamente.

Figura 17 – Análise superficial EPDM a 24 °C na água por 72 h (a) e 504 h (b) e no óleo por 72 h (c) e 504 h (d).



Fonte: Autora (2020).

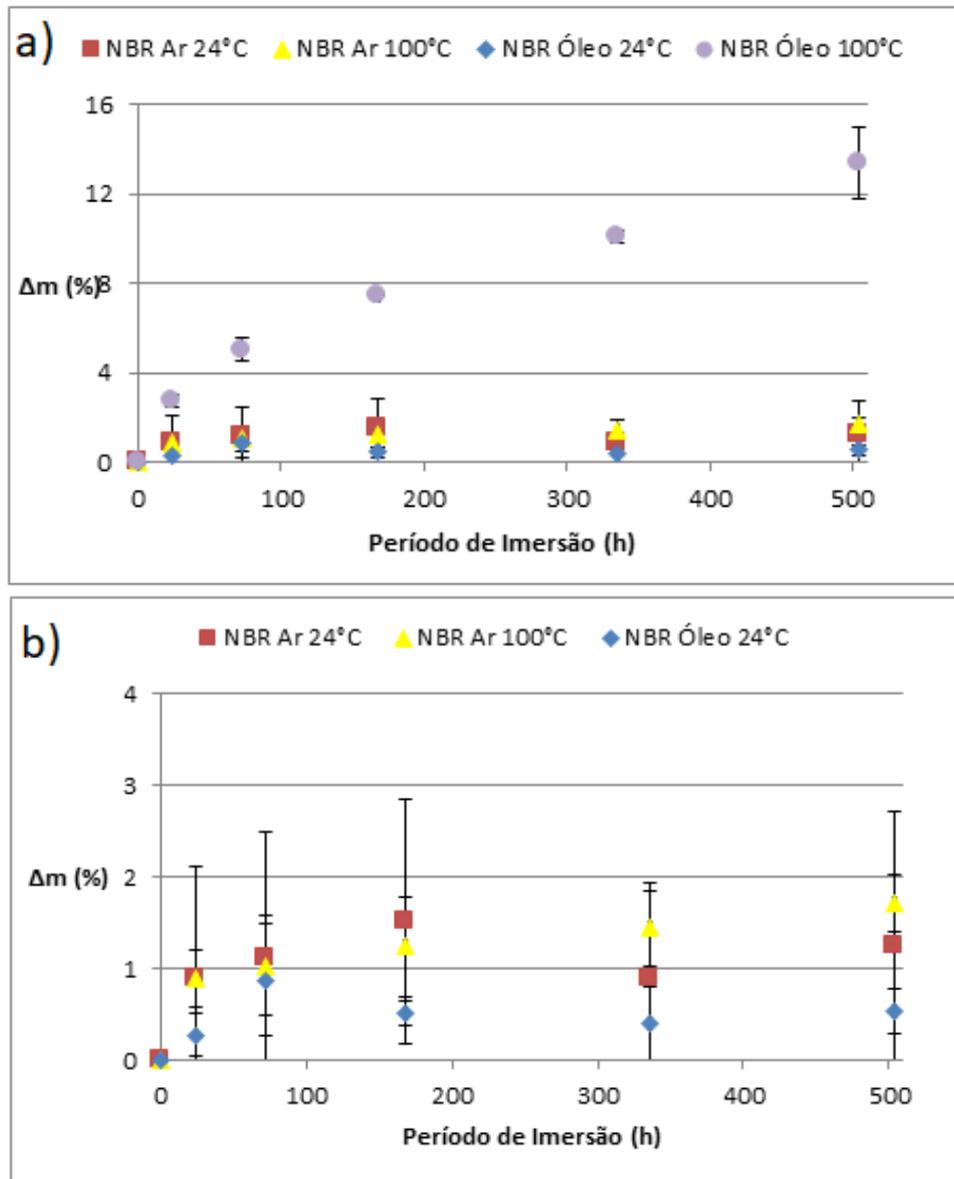
A Figura 17 (d), referente aos CP's em contato com óleo por 504 h, apresenta uma incidência de pontos mais claros, que pode representar um inchamento maior do que as demais condições.

4.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Nesta seção será abordada a influência da temperatura, na metodologia é descrito que foram estudadas 2 temperaturas, 24 e 100 °C. Entretanto, a última temperatura só foi aplicada para NBR em contato com o ar e óleo, conforme apresenta o Quadro 2. Portanto, esse tópico é direcionado apenas a borracha NBR em contato com o ar e óleo, ambos a 24 e 100 °C, totalizando 4 condições.

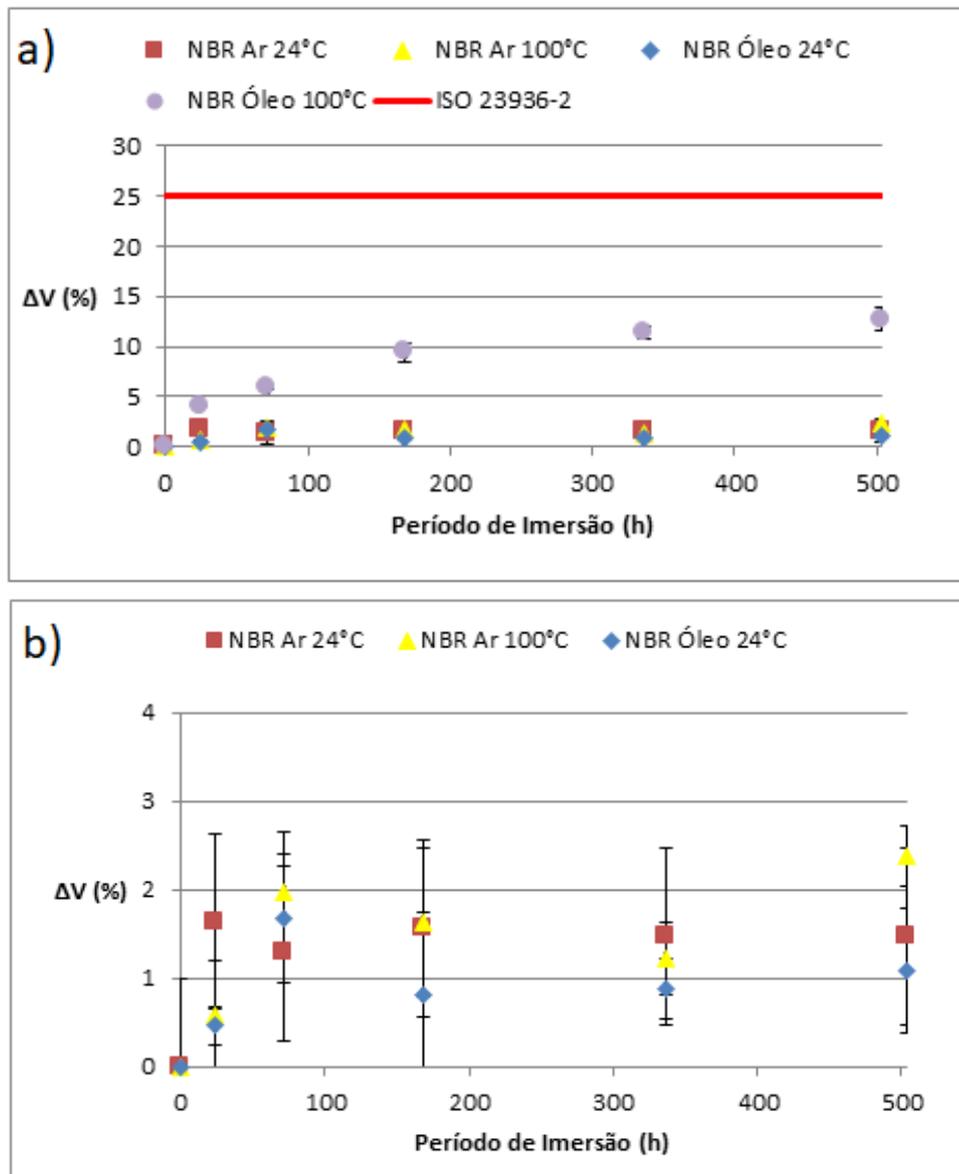
Primeiramente, serão apresentadas as variações de massa e volume nas Figuras 18 e 19, respectivamente. Novamente, ambos os gráficos serão exibidos com duas escalas de eixos das ordenadas distintos, as Figuras 18 (a) e 19 (a) expõem todas as condições estudadas nesta seção e as Figuras 18 (b) e 19 (b) ocultará a condição de óleo a 100 °C, para não prejudicar a resolução dos dados e facilitar a visualização.

Figura 18 - Temperatura NBR variação de massa com (a) e sem (b) o contato com óleo a 100°C.



Fonte: Autora (2020).

Figura 19 - Temperatura NBR variação de volume com (a) e sem (b) o contato com óleo a 100 °C.



Fonte: Autora (2020).

Nas Figuras 18 (b) e 19 (b) fica mais evidente as pequenas variações de massa e volume. As condições de exposição de NBR a água e óleo a 24 °C, já foram comentadas no capítulo 4.1.1. Enfocando nas alterações perante ao ar a 100 °C observa-se que em relação a massa, a variação tende a aumentar com o período de imersão até o seu pico em 1,7 % em 504 h. Já o percentual de volume apresenta um rápido crescimento em 72 h e depois diminui um pouco e aumenta novamente até sua variação máxima de 2,4 % em 504 h. Entretanto, todos os valores permaneceram dentro da faixa de desvio padrão das amostras analisadas.

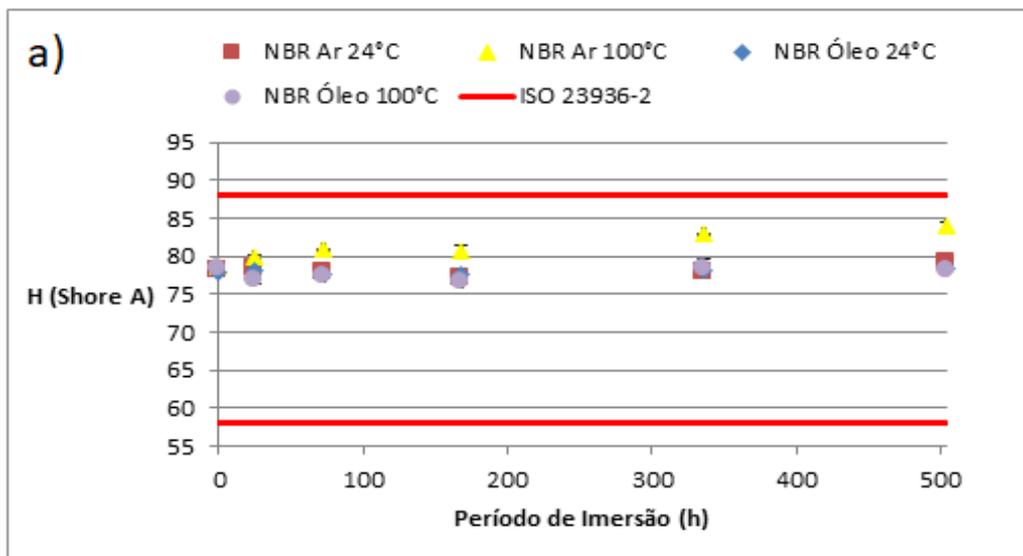
Porém, nas Figura 18 (a) e 19 (a) é mais perceptível a ação do óleo a altas temperaturas em NBR. Essa particularidade se deve supostamente ao fato de ocorrer uma extração dos componentes voláteis do material já nos primeiros períodos de imersão, devido a sensibilidade dos mesmos a temperaturas mais elevadas, isto é, quanto mais alta for a temperatura, mais rápida é a extração desses componentes. (ALVES, 2005). Provavelmente a estabilidade térmica dos CP's em contato com óleo deve ter reduzido devido a uma perda mais rápida de aditivos, tanto de antioxidantes quanto plasticizantes, se tornando mais suscetível a reações de oxidação e mais sensíveis a mudanças na temperatura. (LOU et al., 2018).

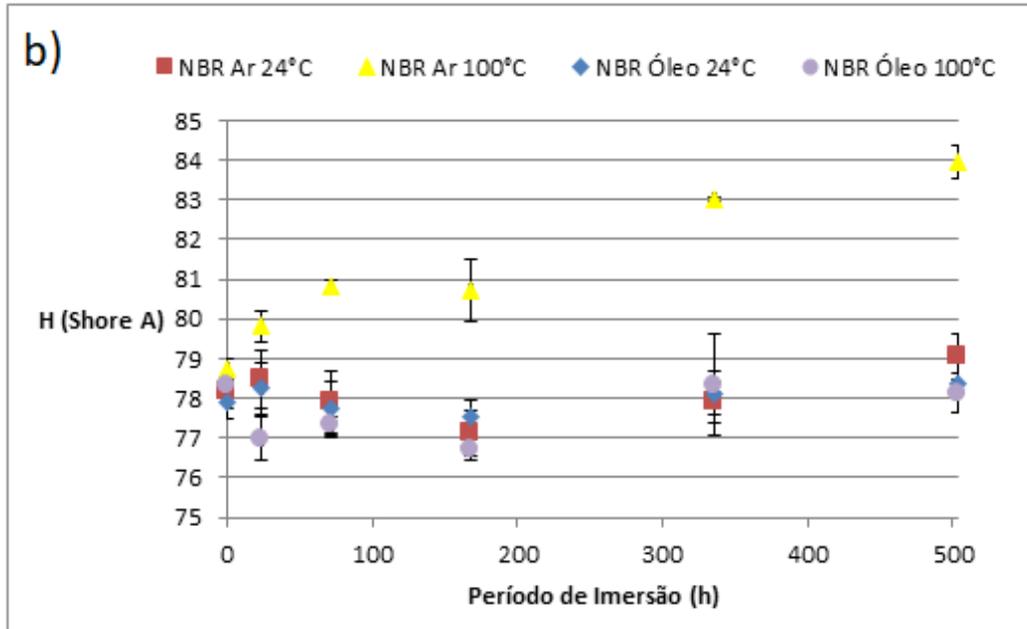
Outro ponto, é que supostamente a insaturação da acrinotrilo pode ter sofrido oxidação, aumentando a densidade de ligações cruzadas, agregando uma certa massa ao material. De acordo com Han et al. (2020), a oxidação das ligações cruzadas e a fratura das cadeias poliméricas, ocorrem simultaneamente na matriz NBR, dificultando a recuperabilidade elástica. Como resultado, o inchamento aumenta com o tempo e temperatura.

Tal como, nas Figuras 18 (a) e 19 (a) é indicado que o efeito do óleo é ainda mais agressivo quanto maior for o período de imersão, pois os gráficos apresentam um comportamento de crescimento, com as variações máximas em 504 h de 13,3 % e 12,8 % de massa e volume, respectivamente. Porém, mesmo nessa temperatura, as variações não ultrapassaram o limite estabelecido pela ISO 23936-2.

A Figura 20 apresenta os resultados de dureza sob influência da temperatura das 4 condições abordadas nesse tópico, também será separado em duas escalas para apresentar o limite ISO 23936-2 (a) e para identificar melhor os resultados (b).

Figura 20 – Temperatura NBR dureza com (a) e sem (b) limite ISO 23936-2.





Fonte: Autora (2020).

Analisando a Figura 20, nota-se valores muito semelhantes para as condições de óleo a 24 e 100 °C e ar a 24 °C, os quais tem a dureza inicialmente de 77 a 78 Shore A, apresentando uma queda pouco significativa de uma unidade Shore A até 168 h de envelhecimento e a partir disso um ligeiro aumento, porém, as oscilações não ultrapassaram 2 unidades de dureza. Já nos CP's em contato com o ar a 100 °C, percebe-se um aumento da dureza com o aumento do período de imersão, com a magnitude inicial de dureza de 78 e alcançando 83 em 504 h. De qualquer forma, o critério ISO 23936-2 não é violado.

É averiguado que a dureza da NBR tem um aumento mais significativo em contato com o ar do que o óleo em altas temperaturas. O desempenho do envelhecimento térmico ocorre de maneira diferente no óleo e no ar. Segundo Liu et al. (2018), três possíveis efeitos podem ser considerados, barreira protetora de óleo, consumo de oxigênio e permeabilidade do óleo.

Quando a NBR é imersa em óleo, o mesmo adere a superfície da borracha formando uma camada protetora. Por um lado, essa barreira dificulta a interação do oxigênio com a borracha, o que diminui as taxas de oxidação. Entretanto, a barreira de óleo pode retardar a volatilização dos aditivos da borracha. Ambas estas particularidades contribuem para a proteção da NBR contra o envelhecimento. (LIU et al., 2018).

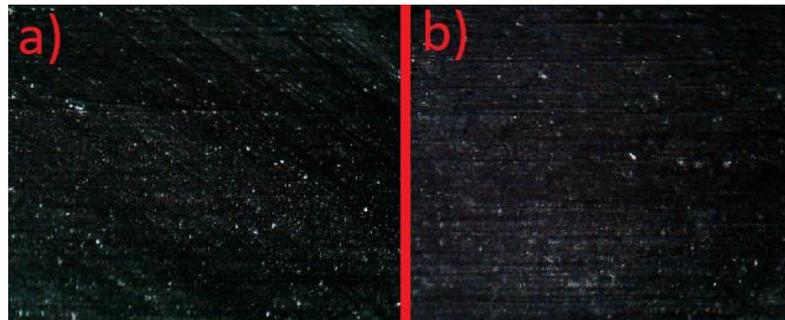
Quando os CP's são expostos ao calor e o oxigênio dentro da estufa, o óleo também sofre uma oxidação. A oxidação do óleo e da NBR é um processo competitivo, os quais ambos consomem o oxigênio dissolvido no óleo. Para esse ponto de vista, a introdução do óleo reduz

a concentração de oxigênio na superfície da borracha, retardando envelhecimento térmico da NBR. (LIU et al., 2018).

A permeabilidade do óleo é limitada devido a pobre compatibilidade dos hidrocarbonetos presente no óleo com a NBR. Provavelmente, a oxidação do óleo tenha levado a produção de alguns componentes que contém oxigênio e que restringiram a penetração no óleo na borracha. (LIU et al., 2018).

A Figura 21 mostra a análise superficial das amostras expostas ao óleo a 100 °C em um período de imersão de 72 h (a) e 504 h (b). Não é perceptível mudanças significativas, porém, a superfície dos CP's após um envelhecimento térmico provavelmente está mais desgastada devido a uma oxidação superficial. (KUJUNDZIC, 2019).

Figura 21 – Análise superficial NBR a 100 °C em óleo por 72 h (a) e 504 h (b).



Fonte Autora (2020).

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho investigou-se o comportamento mecânico de borrachas NBR e EPDM em contato com diferentes meios de exposição e temperaturas por determinados períodos de imersão, com a finalidade de compreender o impacto das condições de operação na estrutura do material.

Para a viabilização do estudo, uma metodologia foi elaborada para analisar a capacidade da borracha de suportar a ação de líquidos em circunstâncias pré-definidas. Sendo assim, amostras foram obtidas de gaxetas comerciais elastoméricas e foram submetidas a simulações, através de equipamentos de laboratório, por exemplo recipientes e estufas.

Tal procedimento é denominado imersão química, podendo ser denominado envelhecimento térmico ao envolver temperaturas mais elevadas, visto que a mesma pode resultar reações de oxidação. Dessa maneira, foram averiguadas a influência desses processos nas propriedades mecânicas do material como dureza e variações de massa e volume.

Todos os procedimentos e critério de avaliação são referenciados em normas, sendo elas ISO 1817 Rubber, vulcanized or thermoplastic- determination of the effect of liquids, para determinar as propriedades mecânicas em contato com líquidos. ISO 23936-2: Petroleum, petrochemical and natural gas industries non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production, para estabelecer a aplicabilidade das borrachas em setores petroquímicos. E a ISO 7619-1:2010-Rubber, vulcanize or thermoplastic- determination of indentation hardness para mensurar a dureza.

Ao introduzir os CP's a diferentes meios de exposição a temperatura ambiente. Percebe-se em borrachas NBR, que o ganho de massa em contato com o ar e água é maior do que no óleo, visto que o mesmo pode contribuir para extração de componentes. Também se constata que a NBR é muito resistente ao óleo, já que os resultados apresentam variações de até 2 % em massa e volume e oscilações de 2 unidade de dureza.

Em contraste, a EPDM mostrasse mais resistente a água, porém muito sensível ao óleo. Visto que a mesma, ao interagir com o óleo apresenta um domínio de reações de cisão de cadeias poliméricas, que facilitam a penetração no óleo em sua estrutura, causando um inchamento. O aumento de volume é progressivo em relação ao período de imersão, tornando os CP's cada vez mais inchados, com variações de 54,4 % e 40,5 % de massa e volume, respectivamente, por consequência, nessa condição a dureza cai com o decorrer do tempo,

apresentando uma queda de 80 para 67 Shore A. Visto que, as reações de cisão de cadeia ocasionam uma queda de dureza.

Quando se aplica temperaturas mais elevadas em NBR, repara-se que a sua resistência ao óleo é afetada, pois ao entrarem em contato com esse meio, apresentam um ganho de massa e volume de 13,3 % e 12,8 %, respectivamente. Isso pode ter ocorrido em virtude da extração de componentes voláteis no material diminuindo a sua estabilidade térmica devido a reações de oxidação. Esse efeito aumenta de acordo com o período de imersão.

Entretanto, analisando a dureza, é observado que essa propriedade em amostras em contato com a ar, tem um aumento maior do que as em contato com o óleo. Podendo-se entender que o óleo retardou o envelhecimento térmico, pois o mesmo pode ter atuado como uma barreira protetora, reduzindo a concentração de oxigênio na superfície, restringindo assim, a penetração do óleo.

O inchamento das amostras foi muito importante para a discussão dos resultados. O mesmo pode ser usado para monitorar as reações de cisão de cadeia e ligações cruzadas. Os esforços em pesquisas voltada a atuação dos elastômeros em condições controladas é fundamental para melhorar a confiabilidade do material, tanto em vedações, fortemente empregado no setor petroquímico, quanto nas demais áreas de aplicação.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se:

- Utilizar técnicas que permitam aprimorar e extrapolar os resultados de teste em escala de curto prazo em laboratório para aplicações em escala de campo, abrangendo anos de vida útil material;
- Analisar o relaxamento de borracha após aplicações de carga próximas a ponto de fratura para monitorar a habilidade de vedação.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Ciro José. **Desenvolvimento de metodologia de ensaios para avaliação comparativa do envelhecimento de borrachas nitrílicas expostas à diversas condições de temperatura e ambiente**. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D471-06**: ASTM D471-06 –Standard Test Method for Rubber Property- Effect of Liquids, 2010.
- CALUMET. Certificate of Analysis. **Indianópolis, 2015**.
- ECYCLE. **Para que serve a água destilada**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/6361-agua-destilada.html>. Acesso em: 15 out. 20.
- FARFÁN-CABRERA, Leonardo Israel et al. Application of digital image correlation technique to evaluate creep degradation of sealing elastomers due to exposure to fluids. **Polymer Testing**, Mexico City, v. 65, p. 134-141, fev. 2018.
- GRISON, Élyo Caetano. **Borracha e seus aditivos**: Componentes, Influência e Segredos. Porto Alegre: Letra Vida, 2010.
- HAN, Ruijie et al. Effects of crosslinking densities on mechanical properties of nitrile rubber composites in thermal oxidative aging environment. **Journal Of Applied Polymer Science**, Beijing, v. 137, n. 36, p. 49076-49086, 7 fev. 2020
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1817**: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of the effect of liquids. 6 ed. Genebra: Aa, 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 23936-2**: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production. Genebra: Cen, 2011.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7619-1**: Rubber, vulcanize for thermoplastic- Determination of Indentaion Hardnes. Genebra, 2010.
- KUJUNDZIC, Emina. **Thermo-oxidative degradation of gasket materials**: investigation of the degradation behaviour of common gaskets used in plate heat exchangers of alfa laval. 2019. 64 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Lund University, Lund, 2019.
- LI, Chengjie et al. Compressive stress-thermo oxidative ageing behaviour and mechanism of EPDM rubber gaskets for sealing resilience assessment. **Polymer Testing**, Chengdu, v. 84, p. 106-118, abr. 2020.
- LIU, Jie et al. Investigation of aging behavior and mechanism of nitrile-butadiene rubber (NBR) in the accelerated thermal aging environment. **Polymer Testing**, Qingdao, v. 54, p.59-66, set. 2016.
- LIU, Xuan et al. Effect of lubricating oil on thermal aging of nitrile rubber. **Polymer Degradation And Stability**, Pequim, v. 151, n. , p.136-143, maio 2018.

LOU, Weitao et al. Influence of hydraulic oil on degradation behavior of nitrile rubber O-rings at elevated temperature. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 92, p. 1-11, out. 2018.

MARK, James E.; ERMAN, Burak; EIRICH, Frederick R. (Ed.). **Science and Technology of RUBBER**. 3. ed. Burlington: Elsevier, 2005

MANSILLA, M.a. et al. Influence of vulcanization temperature on the cure kinetics and on the microstructural properties in natural rubber/styrene-butadiene rubber blends prepared by solution mixing. **European Polymer Journal**, Tandil, v. 69, p.50-61, ago. 2015.

MONTANHEIRO, Maria Nazareth Stolf et al. Determinação da densidade de sólidos e líquidos pelo Princípio de Arquimedes. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Piracicaba, v. 7, n. 2, p. 120-123, ago. 1990.

NBR possesses excellent properties for applications in the oil and gas industry. Leverkusen: **Sealing Technology**, 2013. 16 p.

SALEHI, Saeed et al. Performance verification of elastomer materials in corrosive gas and liquid conditions. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 75, p. 48-63, maio 2019.

SAMSURI, A. Bin. Degradation of Natural Rubber and Synthetic Elastomers. In: SAMSURI, A. Bin; A.A.ABDULLAHI. **Shreir's Corrosion**. Shah Alam: Elsevier, 2017. Cap. 3. p. 2047-2438.

TANASI, Paolo et al. Thermo-reversible crosslinked natural rubber: A Diels-Alder route for reuse and self-healing properties in elastomers. **Polymer**, Madrid, v. 175, p.15-24, jun. 2019.

WOO, Chang Su et al. Useful lifetime prediction of rubber component. **Engineering Failure Analysis**, Daejeon, v. 18, n. 7, p. 1645-1651, out. 2011.

ZIRNSTEIN, Benjamin et al. The impact of polyaniline in phosphorus flame retardant ethylene-propylene-diene-rubber (EPDM). **Thermochimica Acta**, Berlin, v. 673, p. 92-104, mar. 2019.

APÊNDICE A – RESULTADOS MEDIÇÕES EM CONTATO COM O AR

Tabela 1 – Resultados medições em NBR ao ar a 24 °C.

Média N24 AR						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,19
24	0,90	1,64	0,34	0,40	0,72	78,49
72	1,10	1,28	2,76	0,87	0,58	77,91
168	1,52	1,57	0,19	1,29	0,68	77,11
336	0,90	1,48	2,75	0,88	0,42	77,89
504	1,24	1,48	1,90	1,82	0,90	79,04

Fonte: Autora (2020).

Tabela 2 – Resultados medições em EPDM ao ar a 24 °C.

Média E24 AR						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,04
24	0,65	0,74	0,68	0,66	0,54	79,82
72	0,14	1,26	0,87	2,06	0,41	79,38
168	0,36	0,49	0,89	1,84	0,24	78,89
336	0,22	0,16	0,55	2,37	0,72	79,17
504	0,51	0,69	0,34	1,56	0,39	80,02

Fonte: Autora (2020).

Tabela 3 – Resultados medições em NBR ao ar a 100 °C.

Média N100 AR						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,73
24	0,89	0,57	2,15	1,36	1,53	79,81
72	1,03	1,97	2,49	2,14	2,13	80,84
168	1,24	1,62	2,19	2,12	1,25	80,71
336	1,44	1,22	2,29	2,78	1,94	83,00
504	1,72	2,38	2,88	2,17	1,58	83,94

Fonte: Autora (2020).

APÊNDICE B – RESULTADOS MEDIÇÕES NBR ÁGUA A 24 °C

Tabela 4 – Resultados medições em NBR em contato com água a 24 °C.

Média N24 A24						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,43
24	0,41	0,77	0,27	1,41	0,20	78,79
Média N24 A72						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,80
72	0,21	0,78	0,64	1,69	1,94	77,94
Média N24 A168						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,42
168	0,95	1,43	1,04	1,70	1,30	77,27
Média N24 A336						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,01
336	1,23	1,81	3,70	1,36	2,22	78,19
Média N24 A504						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,03
504	1,74	1,91	1,33	1,46	2,16	77,69

Fonte: Autora (2020).

APÊNDICE C – RESULTADOS MEDIÇÕES NBR ÓLEO A 24 ° C

Tabela 5 – Resultados medições em NBR em contato com óleo a 24 °C.

Média N24 O24						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,66
24	0,27	0,46	2,76	2,70	1,30	78,24
Média N24 O72						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,69
72	0,87	1,67	2,30	0,79	1,25	77,73
Média N24 O168						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,47
168	0,50	0,81	3,09	1,32	1,20	77,54
Média N24 O336						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,11
336	0,40	0,87	4,99	1,63	2,79	78,13
Média N24 O504						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,47
504,0	0,54	1,08	2,79	0,53	1,78	78,37

Fonte: Autora (2020).

APÊNDICE D – RESULTADOS MEDIÇÕES EPDM ÁGUA A 24 ° C

Tabela 6 – Resultados medições em EPDM em contato com água a 24 °C.

Média E24 A24						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,12
24	0,65	1,40	0,38	0,37	0,46	80,66
Média E24 A72						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,26
72	0,52	0,94	0,76	0,55	0,29	80,30
Média E24 A168						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,52
168	0,30	0,33	0,87	0,86	0,44	79,90
Média E24 A336						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,62
336	0,44	0,65	0,66	1,14	0,48	80,71
Média E24 A504						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,41
504	0,44	0,91	0,64	1,01	0,35	80,59

Fonte: Autora (2020).

APÊNDICE E – RESULTADOS MEDIÇÕES EPDM ÓLEO A 24 ° C

Tabela 7 – Resultados medições em EPDM em contato com óleo a 24 °C.

Média E24 O24						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	79,37
24	11,39	13,02	3,45	4,08	3,79	72,73
Média E24 O72						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,07
72	20,24	19,12	5,67	5,64	4,29	71,28
Média E24 O168						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	79,99
168	30,59	28,25	6,66	7,63	7,75	68,27
Média E24 O336						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	79,98
336	42,58	34,58	10,73	13,57	10,91	67,26
Média E24 O504						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,51
504	54,41	40,55	12,04	13,22	13,58	67,23

Fonte: Autora (2002).

APÊNDICE F – RESULTADOS MEDIÇÕES NBR ÓLEO A 100 ° C

Tabela 8 – Resultados medições em NBR em contato com óleo a 100 °C.

Média N100 O24						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,26
24	2,76	4,12	4,40	1,85	2,52	76,98
Média N100 O72						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,41
72	5,03	5,93	3,32	3,74	4,17	77,31
Média N100 O168						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,97
168	7,45	9,43	5,47	0,71	5,08	76,70
Média N100 O336						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,24
336	10,07	11,38	5,19	3,27	2,25	78,34
Média N100 O504						
período (horas)	Δm	ΔV	Δt	Δw	Δl	H
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	78,67
504	13,36	12,75	4,61	6,86	3,28	78,12

Fonte: Autora (2020).