

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

AVITAL GABRIEL DE ALMEIDA ROSA

**COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
UTILIZADOS NO ANEL DE ATRITO DO AMORTECEDOR TORCIONAL DE
DISCOS DE EMBREAGEM**

Sorocaba
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

AVITAL GABRIEL DE ALMEIDA ROSA

**COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS
UTILIZADOS NO ANEL DE ATRITO DO AMORTECEDOR TORCIONAL DE
DISCOS DE EMBREAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, para obtenção do título de Mestre em Ciências dos Materiais

Orientação: Profa. Dra. Andrea Madeira Kliauga

Sorocaba
2017

Gabriel de Almeida Rosa, Avital

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS UTILIZADOS NO ANEL DE ATRITO DO
AMORTECEDOR TORCIONAL DE DISCOS DE EMBREAGEM / Avital
Gabriel de Almeida Rosa. -- 2017.

115 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: . Andrea Madeira Kliauga

Banca examinadora: Luciana Sgarbi Rossino, Izabel Fernanda Machado

Bibliografia

1. compósitos poliméricos. 2. Atrito e desgaste. 3. estabilidade térmica.
I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVITAL GABRIEL DE ALMEIDA ROSA

**“COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS UTILIZADOS NO ANEL DE ATRITO DO
AMORTECEDOR TORCIONAL DE DISCOS DE EMBREAGEM”.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais - PPGCM, para obtenção do título de mestre em Ciência dos Materiais. Área de concentração Nanociência e Nanotecnologia de Materiais, da Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, 18 de outubro de 2017.

Orientador(a)



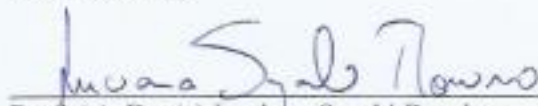
Prof. (a). Dr. (a) Andrea Madeira Klikauga
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos

Examinador(a)



Prof. (a). Dr. (a) Izabel Fernanda Machado
USP – Universidade de São Paulo, campus São Paulo.

Examinador(a)



Prof. (a). Dr. (a) Luciana Sgarbi Rossino
FATEC – Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.



DEDICATÓRIA

Dedico esta Dissertação aos meus avôs, Avital e Pedrilha, por todo amor, carinho, exemplo, dedicação, doação, sem os quais eu jamais teria conseguido nada em minha vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço principalmente a Deus pela minha inspiração, força de vontade e por nunca ter me abandonado nos momentos mais difíceis de minha vida.

A meus pais, por me educarem e ensinarem que nada pode ser feito para que desistamos dos nossos sonhos, mesmo nas dificuldades. Vocês me fizeram forte, me fizeram levantar a cabeça e seguir em frente, ultrapassando limites que nem eu mesmo sabia que era capaz.

A minha esposa, pelo amor, apoio e o incentivo durante toda “peregrinação” deste Mestrado.

Aos meus irmãos pelos conselhos, orientações, amor e carinho nos momentos difíceis e pelo apoio nas minhas decisões.

Aos meus tios e padrinhos, pois devo a eles todo meu respeito e gratidão.

A professora Dra. Andrea Madeira Kliauga pela preciosa e competente orientação no trabalho, e pelo fundamental apoio que tanto ajudaram a elucidar momentos difíceis e decisivos deste mestrado.

Aos demais professores por terem passado os conhecimentos necessários e imensuráveis para a conclusão do mestrado.

A Empresa Schaeffler do Brasil pelo apoio financeiro e pela grande oportunidade oferecida através do apoio profissional. Em especial, ao diretor de Engenharia e Desenvolvimento Cláudio Fernandes de Castro por toda confiança em mim depositada.

RESUMO

O motor de três cilindros tende a ter vibrações maiores que do motor de quatro cilindros. Nesta nova configuração o sistema de transmissão e, em particular, o amortecedor torcional do disco de embreagem fica sujeito a condições de desgaste e atrito mais severas. O grande desafio atual está na busca de componentes com baixo desgaste e um coeficiente de atrito adequado e que elimine os ruídos.

Neste trabalho foram caracterizados os materiais utilizados na fabricação de anéis de atrito do amortecedor torcional de discos de embreagem quanto à resistência ao desgaste e atrito. Dois dos três materiais são hoje utilizados no mercado como componente de anel de atrito (PA66GF35 e elastômero NBR) em motores de quatro cilindros e o terceiro é atualmente utilizado em Lonas de embreagem.

A primeira etapa consistiu na caracterização microestrutural e determinação da estabilidade térmica dos três materiais sem a influência de atrito. Para isso foram realizadas análises em microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), teste de queima para porcentagem de fibra e tratamentos de envelhecimento, seguido de análises através de calorimetria diferencial, dureza, espectroscopia no infravermelho. Dentre os três materiais a lona de embreagem mostrou ser a mais estável na faixa de temperaturas entre 80 e 150°C. O PA66GF35 sofreu alteração de cristalinidade e o NBR endurecimento devido à degradação térmica.

A segunda consistiu na determinação das características de desgaste do material em função das variáveis de influência em condições controladas de laboratório. Para isso foi realizado um teste de bancada com o objetivo de medir a taxa de desgaste e coeficiente de atrito do material em condições extremas de pressão específica e velocidade (DIN50320, 1979).

Os resultados do ensaio o atrito teve a seguinte classificação: NBR (0,13) >PA66GF35 (0,11) > Lona (0,09). Apesar de ter um coeficiente de atrito menor, a Lona de embreagem foi o único material que atingiu a resistência ao desgaste mínima exigida para o anel de atrito. Portanto a Lona de embreagem é o melhor material para um motor 3 cilindros que exige uma maior resistência ao desgaste e térmica, no disco de embreagem.

Palavras-chave: Atrito, desgaste, PA66GF35, borracha nitrílica, Lona de embreagem, compósitos poliméricos, estabilidade térmica.

ABSTRACT

The three cylinder motors tend to vibrate more than the conventional four cylinder ones. In this new condition the transmission system and in particular the torsional damper of the clutch disc is subjected to sever wear and friction. The great challenge is to select new materials with low wear rate and adequate friction coefficient to attenuate this new vibration level.

In this work three different candidate materials to be used as friction rings inside the torsional damper of clutch discs were tested in terms of wear resistance and friction. Two of the studied materials are currently used in the market (PA66 35 GF and NBR) in four cylinder motors and the third is currently used in clutch facing (NBR matrix composite). The materials were purchased from Schaeffler suppliers.

The first step was the microstructural characterization and determination of the thermal stability of the three materials without the influence of friction. For that, the microstructure was analyzed by optical and electronic microscopy of Scanning (SEM), the amount of fibers and inorganic reinforcers was determined by burning tests and, the transition temperatures were determined by differential calorimetry. Two aging temperatures were studied 80 and 150°C. The effect of the ageing time was determined by hardness and infrared spectroscopy measurements. Among the three materials the clutch facing, showed a more stable structure in the temperature range between 80 and 150°C. The PA66GF35 suffered changes in crystalline content and the NBR thermal degradation.

The second step consisted in determining the wear characteristics of the material in bench tests with the objective of measuring the wear rate and friction coefficient of the material under extreme conditions of specific pressure and velocity (DIN50320, 1979).

The results of the friction test had the following classification: NBR (0.13)> PA66GF35 (0.11)> clutch facing (0.09). Despite having a lower coefficient of friction, the clutch facing was the only material that achieved the minimum wear resistance required for the friction ring. Therefore the clutch facing is the best material for a 3 cylinder engine that requires a higher wear and thermal resistance on the clutch plate.

Key words: Friction, wear, PA66GF35, nitrile rubber, clutch facing, polymer composites, thermal stability.

Lista de Figuras

Figura 1.: Ilustração da localização de uma embreagem no carro.....	5
Figura 2.: Ilustração da localização de uma embreagem no carro.....	6
Figura 3.: Ilustração de um disco de embreagem.	7
Figura 4.: Ilustração dos componentes de um disco de embreagem.	7
Figura 5.: Esquema de reação de condensação para obtenção da PA6,6.	9
Figura 6.: Coeficiente de atrito do PA66 relacionado com a rugosidade do contra corpo de aço.	9
Figura 7.: Micrografia de um compósito de PA66GF30, (feixe de eletrônico de 15Kv e ampliação de 1000 vezes).....	10
Figura 8.: Esquema de reação de poliadição para obtenção do elastômero NBR.	11
Figura 9.: Figura do processo produtivo de lonas de embreagens	15
Figura 10.: Caracterização das interações de um sistema Tribológico.....	18
Figura 11.: Ilustração da pequena área real de contato entre duas superfícies rugosas, onde a somatória de “Ai” equivale à área real de contato.....	19
Figura 12.: Esquema ilustrando de contato por escorregamento.....	20
Figura 13.: Esquema ilustrando de contato por rolamento.....	21
Figura 14.: Esquema ilustrando de contato por rotação.	21
Figura 15.: A) Componente de adesão μ_a e o B) Componente de deformação μ_d	23
Figura 16.: Desenho esquemático do modo representativo de desgaste adesivo.	24
Figura 17.: Desenho esquemático do modo representativo de desgaste abrasivo.	25
Figura 18.: .Desenho esquemático do modo representativo de desgaste por fadiga.	25
Figura 19.: Desenho esquemático do modo representativo de desgaste corrosivo.	26
Figura 20.: Comportamento do Coeficiente de atrito nos Compósitos de Nylon.Coeficiente de atrito medido após uma estabilização de 20.000ciclos, sobre uma velocidade de 14.05 metros por minuto, com uma carga de 600 N.	29
Figura 21.: Comportamento Desgaste e atrito do PA66 com diferentes quantidades de reforço de nano de argila sob uma carga de a) 5N; b) 10 N.	30
Figura 22.: Comportamento do Desgaste e atrito do PA6 com fibra de vidro, trabalhando com e sem lubrificação.....	31

Figura 23.: Comportamento do Desgaste e atrito do PA6 com diferentes porcentagens de fibra de vidro no trabalho a seco.	31
Figura 24.: Comportamento do atrito do PA com fibra de vidro e teflon, trabalhando a seco.	32
Figura 25.: Comportamento do Desgaste do PA com fibra de vidro e teflon, trabalhando a seco.	33
Figura 26.: Comportamento do atrito do PA em relação a rugosidade do contra corpo de aço, trabalhando a seco.	34
Figura 27.: Taxa de desgaste do PA66 e do PA66 com 35% de FV e 15% de PTFE (RFL4036) nos contra corpos aço, alumínio e bronze.....	34
Figura 28.: Comportamento do Desgaste e atrito do PA6 com fibra de vidro.	35
Figura 29.: Comportamento do Coeficiente de atrito do Elastômero NBR (Alpha 66) e do Aço.	37
Figura 30.: Variação do coeficiente de atrito em ensaio de atrito sob amplitude de 2mm.....	38
Figura 31.: Gráfico de Amplitude em relação a Coeficiente de atrito.....	38
Figura 32.: Coeficiente de atrito e desgaste do Elastômero NBR contra o Aço inoxidável, com e sem envelhecimento a 80°C.....	39
Figura 33.: Deslizamento em relação a variação de temperatura do NBR com AISIN 52100, carga de 3,15N e velocidade de 0,8m/s. a) sem lubrificação e b) com lubrificação.	40
Figura 34.: Coeficiente de atrito estático e dinâmico da borracha NBR com ou sem lubrificação.	40
Figura 35.: Variação de temperatura em relação a distância percorrida da borracha NBR, de três amostras com 1 e 3 gotas de lubrificação e a seco.....	41
Figura 36.: Variação do desgaste em relação a distância percorrida da borracha NBR.....	42
Figura 37.: Comportamento do copolímero NBR com diferente % de PVC, a) Coeficiente de atrito e b) Desgaste.	42
Figura 38.: Variação do coeficiente de atrito e a velocidade da borracha NBR com adição de até 20% de SiO ₂ , a) sem recozimento e b) com recozimento.....	43
Figura 39.: Variação do coeficiente de atrito e a velocidade da borracha NBR, a) sem lubrificação e b) com lubrificação.	44
Figura 40.: Gráfico relacionando desgaste com a carga aplicada.....	44
Figura 41.: Gráfico relacionando coeficiente de atrito com a carga aplicada.	45
Figura 42.: Variação do coeficiente de atrito e a velocidade da borracha NBR.....	46

Figura 43.: Comportamento do desgaste em relação a variações da carga para a lona. Condições de ensaio: velocidade de deslizamento 750 rpm, tempo de ensaio de 180 minutos...	48
Figura 44.: Comportamento do desgaste e do coeficiente de atrito da lona de embreagem contra o Ferro fundido. Condição topográfica inicial da Lona: a) no desgaste; b) no atrito	49
Figura 45.: Comportamento do atrito em relação a temperatura durante um período de tempo..	49
Figura 46.: Coeficiente de atrito da lona com carga de 100N variando o tempo de ensaio e a velocidades: 100rpm, 500rpm e 750rpm.	50
Figura 47.: Coeficiente de atrito da lona variando o tempo de ensaio e a cargas: 60N, 180N e 240N.	51
Figura 48.: Gráfico de aceleração, velocidade e coeficiente de atrito de uma lona	52
Figura 49.: Comportamento do desgaste da lona no Ferro fundido relacionando a temperatura e a energia do sistema de atrito.....	53
Figura 50.: Comportamento do atrito em relação a temperatura durante um período de tempo..	53
Figura 51.: Comportamento do desgaste em relação da temperatura e a carga da lona.....	54
Figura 52.: Comportamento do coeficiente de atrito, velocidade e da carga aplicada na lona.	55
Figura 53.: Variação da taxa de desgaste da lona reforçada com fibra de carbono (FC) ou fibra de vidro (FV), em análise da: a) Velocidade, b) Carga e c) Temperatura.....	56
Figura 54.: Variação do coeficiente de atrito da lona com FV, em relação: a) Velocidade, b) Carga e c) Temperatura.	56
Figura 55.: Comportamento do aumento de temperatura em relação a perda de massa da lona..	57
Figura 56.: Foto do contra corpo metálico do Anel de atrito.	61
Figura 57.: Foto do Anel de atrito PA66GF35.	61
Figura 58.: Foto do Anel de atrito Elastômero NBR.....	62
Figura 59.: Foto do Anel de atrito da Lona de embreagem.	63
Figura 60.: Visão geral do Forno mufla do ensaio de envelhecimento térmico.....	64
Figura 61.: Visão geral do bico de bunsen e cadinho.....	64
Figura 62.: Foto dos Microscópios a)Ótico e b) de Eletrônico de Varredura.	65
Figura 63.: Foto do Espectrômetro DSC da Schaeffler.	66
Figura 64.: Foto do Espectrômetro FTIR da Schaeffler.	66
Figura 65.: Foto do Durometro Shore D.	67

Figura 66.: Esquema do sistema de atrito utilizado no ensaio de atrito e desgaste.	68
Figura 67.: Esquema da máquina de ensaio de atrito e desgaste.	69
Figura 68.: Visão geral da máquina de ensaio de desgaste.	69
Figura 69.: Esquema da máquina do controle de histerese.	70
Figura 70.: Visão geral da máquina de controle de histerese.	71
Figura 71.: Microscopia óptica ampliada em 50x do NBR.	74
Figura 72.: Microscopia óptica ampliada em 100x da PA66GF35.	75
Figura 73.: Microscopia óptica ampliada em 50x da Lona de embreagem.	75
Figura 74.: MEV com visão total da lona.	76
Figura 75.: MEV e EDS evidenciando o cobre da lona.	76
Figura 76.: MEV e EDS evidenciando a fibra de vidro da lona.	77
Figura 77.: MEV e EDS evidenciando a fibra de vidro e acrílico da lona.	77
Figura 78.: MEV e EDS evidenciando a matriz da lona.	78
Figura 79.: MEV e EDS evidenciando a matriz da lona.a) partícula alongada indicando a presença de Si e Ca (fibra de vidro picada); b) partículas contendo Ti e O.	78
Figura 80.: Gráficos do ensaio de DSC do PA66GF35 ensaio feito com taxa de aquecimento de 10°C/min.	80
Figura 81.: Gráfico do ensaio de DSC do elastômero NBR.	81
Figura 82.: Gráfico do ensaio de DSC da Lona de embreagem.	82
Figura 83.: Envelhecimento térmico em relação a dureza do material a) geral, b) PA66GF35, c) Elastômero NBR e d) Lona de embreagem.	83
Figura 84.: Comparação dos Espectros FTIR por ATR da PA66GF35 por refletância.	85
Figura 85.: Foto do anel de PA66GF35: a) antes do envelhecimento, b) após o envelhecimento a 80°C e c) após o envelhecimento a 150°C.	86
Figura 86.: Comparação dos Espectros FTIR por ATR do elastômero NBR refletância.	87
Figura 87.: Comparação dos Espectros FTIR da Lona por refletância.	89
Figura 88.: Curva de Gauss da amostra de PA66GF35 durante o ensaio tribológico.	90
Figura 89.: Curva de Gauss da amostra do elastômero NBR durante o ensaio tribológico.	90
Figura 90.: Curva de Gauss da amostra de Lona de Embreagem durante o ensaio.	91
Figura 91.: Controle da Dureza após termino do ensaio tribológico.	92
Figura 92.: Propriedades Mecânicas do da poliamida 6.6 reforçada com fibras de vidro: a) Variação do módulo elástico em função da temperatura e b) Variação do limite de escoamento com o teor de umidade.	93
Figura 93.: Fotografia do anel de atrito PA66GF35 após o ensaio tribológico.	95

Figura 94.: Fotografia do anel de atrito Elastômero NBR após o ensaio tribológico.....	95
Figura 95.: Fotografia do anel de atrito da Lona de Embreagem após o ensaio tribológico.	96
Figura 96.: Taxa de desgaste após 5.000.000 ciclos.....	98
Figura 97.: Taxa de desgaste após 1.000.000 ciclos.....	99
Figura 98.: Coeficiente de atrito durante o ensaio.....	100
Figura 99.: MEV da superfície de atrito após teste da Poliamida.	101
Figura 100.: EDS evidenciando a superfície da PA66GF35 após ensaio tribológico.a) partícula de ferro; b) e c)tribofilme e degradação do anel.....	102
Figura 101.: MEV da superfície de atrito após teste do elastômetro NBR.	103
Figura 102.: EDS evidenciando a superfície do NBR após ensaio tribológico.....	103
Figura 103.: MEV da superfície de atrito após teste da lona.....	104
Figura 104.: EDS evidenciando a superfície da Lona após ensaio tribológico.a) tribofilme com partícula de ferro; b) partículas contendo elementos da Lona com ferro do conta corpo de aço.	105

Lista de Tabelas

Tabela 1.: Comparação das propriedades do PA66 e o PA66GF35.....	11
Tabela 2.: Propriedades do Elastômero NBR com diferentes porcentagens de Acrilonitrila...	12
Tabela 3.: Propriedades dos compósitos de freios e lonas com reforço de fibra metálica	16
Tabela 4.: Propriedades controladas das amostras PA66GF35.	62
Tabela 5.: Propriedades controladas das amostras do NBR.	62
Tabela 6.: Propriedades controladas das amostras da Lona de embreagem.....	63
Tabela 7.: Triplicata do teste de queima da amostra do PA66GF35.	79
Tabela 8.: Triplicata do teste de queima da amostra da lona de embreagem.	79
Tabela 9.: Resultado do desgaste tribológico.	96

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiv
1. INTRODUÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Descrição do problema	5
2.2. Escolha do Material Estudado	8
2.2.1. Compósito de Poliamida 66 com Fibra de vidro	8
2.2.2. Elastômero NBR	11
2.2.3. Compósito de Elastômero NBR com cargas e Fibras de Reforço (Lona de embreagem)	13
2.3. Conceitos Fundamentais em Tribologia	16
2.3.1. Contato entre superfícies.	18
2.3.2. Atrito	19
2.3.3. Desgaste	24
2.4. Comportamento em desgaste dos materiais de atrito da embreagem	27
2.4.1. Comportamento do PA66	28
2.4.2. Comportamento do Elastômero NBR	36
2.4.3. Comportamento da Lona de Embreagem	47
2.4.4. Resumo da revisão da literatura dos materiais estudados	58
3. MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1. Materiais	60
3.2. Caracterização dos Materiais de Estudo	63
3.2.1. Ensaio de Envelhecimento térmico	63
3.2.2. Ensaio de Queima	64
3.2.3. Microscopia Óptica e de Varredura	65
3.2.4. Análise por calorimetria diferencial exploratória DSC	65
3.2.5. Técnicas de Espectroscopia nas faixas de luz visível e de infravermelho	66
3.2.6. Técnica de ensaio de Dureza Shore D	67
3.3. Ensaio de Atrito e desgaste	67
3.3.1. Dispositivo para o ensaio de Atrito e Desgaste.	67
3.3.2. Parâmetros e Máquinas de Ensaio de Atrito e desgaste	68

3.3.3. Controle do Atrito.....	70
3.3.4. Controle do Desgaste.....	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1. Caracterização dos materiais	74
4.1.1. Microscopia Óptica.....	74
4.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	76
4.1.3. Resultado do Ensaio de Queima	79
4.2. Estabilidade Térmica	80
4.2.1. Resultado da Análise por calorimetria diferencial exploratória DSC	80
4.2.2. Resultado da Dureza Shore D para Ensaio de Envelhecimento térmico.....	82
4.2.3. Resultado da Espectroscopia nas faixas de luz infravermelho para Ensaio de Envelhecimento térmico.....	84
4.3. Ensaio tribológico.....	90
4.3.1. História térmica gerada no ensaio tribológico.....	90
4.3.2. Dureza gerada após o ensaio tribológico.....	91
4.3.3. Morfologia e perda de volume ensaio tribológico.....	94
4.3.4. Coeficiente de atrito gerado durante o ensaio.....	99
4.3.5. Análise das superfícies de desgaste.....	100
5. CONCLUSÕES.....	106
Referências Bibliográficas.....	109

1. Introdução

A embreagem trabalha para transmitir a rotação do motor à caixa de mudanças (cambio) e permitir a mudança de marchas enquanto o veículo se encontra em movimento. Elementos de atrito são utilizados para diminuir reduzir o movimento relativo entre as partes de acoplamento e transmitir torque do motor para o câmbio, mas ao mesmo tempo tem a função de eliminar vibrações e trepidações, amortecer esforços torcionais, e também promover conforto no acoplamento e desacoplamento. Elementos de atrito de matriz polimérica estão presentes na área de acoplamento do disco da embreagem e no amortecedor radial conhecido também como amortecedor torcional (BRAZOLIN, 2010; DREXL, 1998 e ROSA, 2012).

Com a introdução do motor três cilindros ao mercado nacional e internacional, temos uma maior oscilação se compararmos com os motores tradicionais de 4 cilindros, portanto o sistema tribológico do amortecedor do disco de embreagem terá que ser mais resistente. O material de sacrifício precisa ser melhorado ou substituído para adaptar às estas inovações

A matriz polimérica além de possuir função estrutural, tem contribuição fundamental sobre as características tribológicas dos compósitos. A matriz deve possuir resistência, estabilidade térmica e apresentar um comportamento de degradação previsível para que o compósito tenha um bom desempenho quanto ao desgaste (GOPAL, 1995 e ROSA, 2012).

Carga aplicada e velocidade relativa interagem na energia total transmitida durante o contato. Como os polímeros apresentam baixa condutividade térmica esta energia se converte em calor aquecendo o material durante o processo. Ocorrem, portanto, alterações importantes no comportamento em desgaste e no atrito devido à mudança de resistência mecânica. Além disso, o próprio material pode sofrer alterações microestruturais (envelhecimento) neste processo (SANTANA, 2009; PENEV, 2013; WANG, 2015; ROCHA, 2007; UNAL, 2006; BO UM, 2007; CHEN, 2003; GOPAL, 1995; RODRIGUES, 2007 e PRITZELWITZ, 2010). Com o objetivo de entender melhor os fenômenos envolvidos a dissertação se divide em duas etapas:

A primeira etapa consistiu na caracterização microestrutural e determinação da estabilidade térmica dos três materiais sem a influência de atrito. Para isso foram realizadas análises em microscopia óptica e eletrônica de Varredura (MEV), Teste de Queima para porcentagem de fibra e tratamentos de envelhecimento, seguido de análises através de calorimetria diferencial, dureza, espectroscopia no infravermelho.

A segunda consistiu na determinação das características de desgaste do material em função das variáveis de influência em condições controladas de laboratório. Para isso foi realizado um teste de bancada com o objetivo de medir a taxa de desgaste e coeficiente de atrito do material em condições extremas de pressão específica e velocidade (DIN50320, 1979).

2. Revisão Bibliográfica

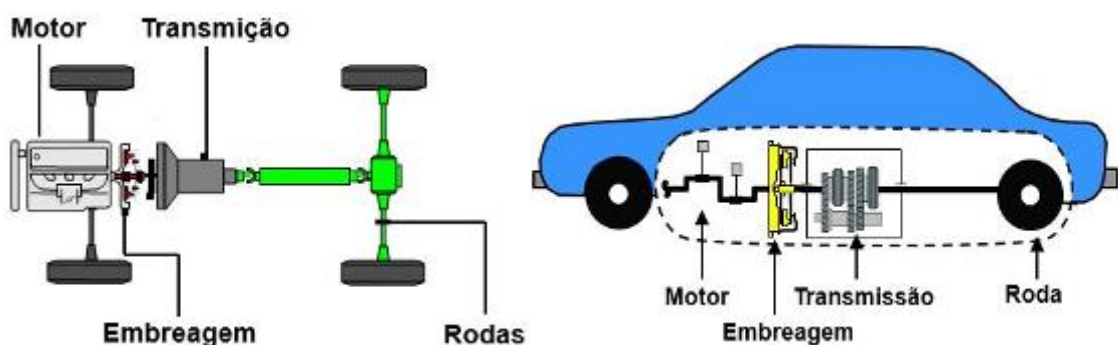
Neste capítulo é apresentado o levantamento do estado da arte referente à tribologia de polímeros. De modo geral, focou-se nos materiais que são objetos de estudo da presente dissertação de mestrado. São abordados os conceitos fundamentais da tribologia, seguido de uma discussão dos principais parâmetros que influenciam o atrito e o desgaste nos sistemas de deslizamento a seco de sistemas metal-polímero.

2.1. Descrição do problema

A embreagem é um subcomponente do sistema de transmissão manual do motor, com a função de transmitir a rotação do motor à caixa de cambio, que por sua vez transmitirá para o diferencial que está ligado diretamente as rodas do auto, assim fazendo as rodas girarem deslocando o carro. A embreagem também é responsável por interromper essa transmissão, para que haja troca de marcha com o carro já em movimento (BRAZOLIN, 2010; DREXL, 1998).

A embreagem atua no momento que o motorista aciona o pedal e um sistema de alavancas é posto em funcionamento por intermédios de um cabo ou por acionamento hidráulico como mostra a Figura 1.

Figura 1.: Ilustração da localização de uma embreagem no carro.



Fonte: Schaeffler Group Ltda.

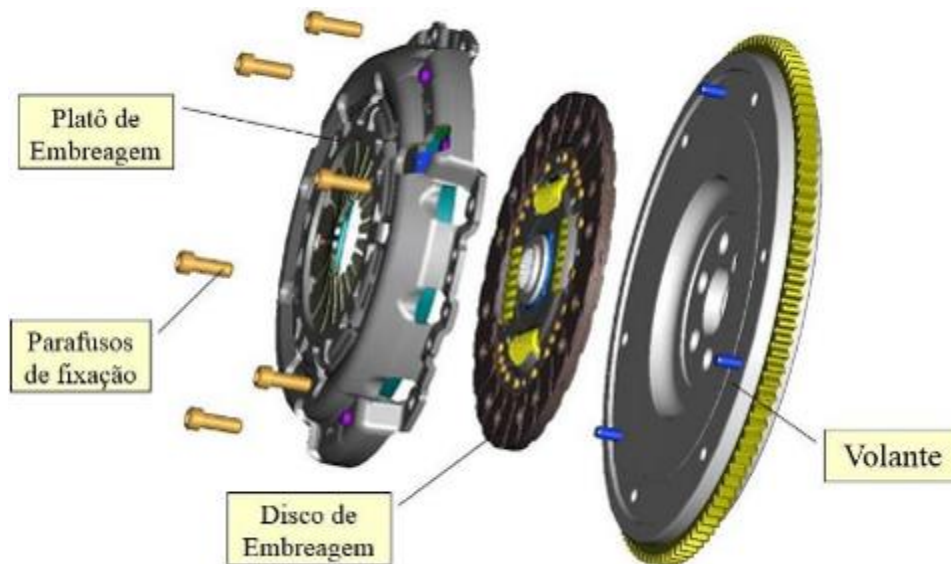
Geralmente motores menores se optam pelo uso de cabo, e em motores maiores usa-se sistema hidráulico de embreagem (composto por óleo de freio, cilindro mestre, tubo de alta pressão, tubo de baixa pressão e cilindro escravo). Tanto no sistema de cabo quanto no

sistema de acionamento hidráulico a função é a mesma, acionar a mola membrana que é localizada no platô de embreagem, ocorrendo o afastamento da placa de pressão, e deixando o disco com giro livre de arraste.

O sistema é composto por disco, platô e volante de embreagem, o volante tem a função de receber a energia do motor a combustão, através de uma correia dentada, como mostra na Figura 2.

O platô (conhecido também como chapéu chinês) tem por objetivo aplicar a força contra o disco e o volante, fazendo que ocorra a transmissão do torque, ao mesmo tempo acoplando e desacoplando o disco de embreagem para que haja a troca de marca com conforto. E por último o disco de embreagem que tem a responsabilidade de transmitir a energia do volante e platô ao câmbio.

Figura 2.: Ilustração da localização de uma embreagem no carro.



Fonte: Schaeffler Group Ltda.

Segundo Rodrigues (2007), nos motores de torque elevado utilizados em baixa rotação, o disco de embreagem deve possuir um mecanismo de absorção que iniba a transferência das vibrações do motor para a transmissão. Desta maneira, as principais funções do disco são além da transmissão do torque do motor para o câmbio, eliminar vibrações, amortecer esforços torcionais, eliminar trepidações e também promover conforto no acoplamento e desacoplamento (Figura 3).

Figura 3.: Ilustração de um disco de embreagem.

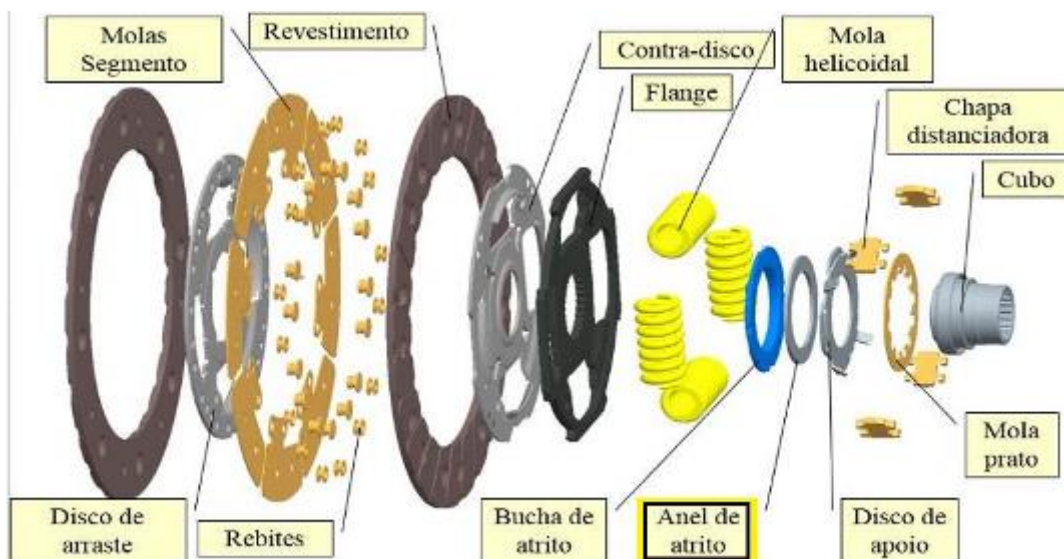


Fonte: Schaeffler Group Ltda.

Com o desacoplamento do disco interrompe a transmissão do torque do motor para o câmbio, podendo ocorrer neste momento à troca de marcha sem danificar as engrenagens da caixa de câmbio.

A Figura 4 evidencia os componentes do amortecedor torcional do disco, sendo composto por cubo, disco de arraste, molas helicoidais, molas pratos, contra atrito, e o material estudado: o anel de atrito chamado material de sacrifício.

Figura 4.: Ilustração dos componentes de um disco de embreagem.



Fonte: Schaeffler Group Ltda.

Com a chegada do motor 3 cilindros no mercado, é necessário rever as questões de desgaste e atrito, pois as vibrações tendem a ser maiores que do motor convencional. O grande

desafio atual está na busca de um material com baixo desgaste e um coeficiente de atrito adequado que elimine os ruídos.

2.2. Escolha do Material Estudado

No mercado utiliza basicamente materiais termoplásticos reforçados com fibras, para a função de anel de atrito, muito raramente são utilizados metal ou elastômero sem carga de reforço nesta função. Os termoplásticos reforçados possuem menor densidade e menor custo comparado aos metais e maior resistência ao desgaste e a temperatura comparado aos elastômeros (ROSA, 2012, ROSA, 2014).

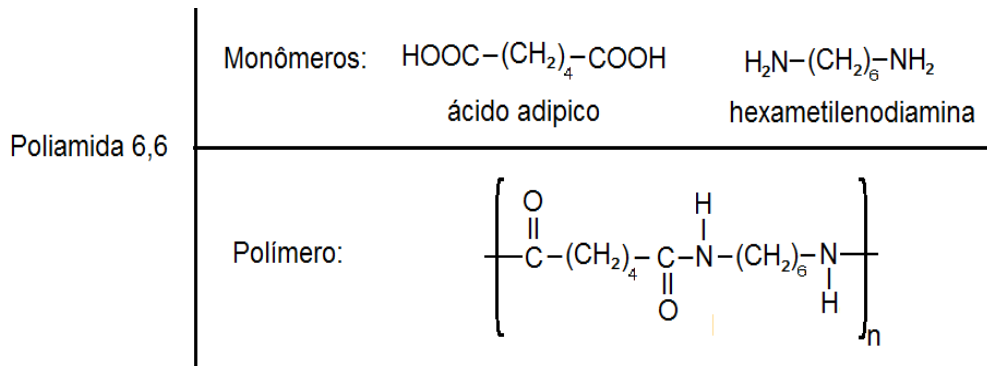
Este trabalho compara o comportamento em desgaste dos dois materiais mais utilizados neste componente: O termoplástico Poliamida 6,6 com 35% de fibra de vidro (PA66GF35) e o elastômero nitrílico NBR conhecido como Alpha 66. Como material alternativo, é proposto um compósito de matriz de elastômero NBR com cargas de óxido, conhecido popularmente como Lona de embreagem (comercial Schaeffler B-8080) é reforçado por fibras de vidro, aramida, acrílica e cobre, com composição semelhante à utilizada no disco da embreagem.

2.2.1. Compósito de Poliamida 66 com Fibra de vidro

A Poliamida, também conhecida por náilon, é classificada com um termoplástico, usualmente identificado por um sistema numérico, que identifica o monômero que encontra-se no polímero. O número representa quantos átomos de carbono existe em cada unidade de repetição da cadeia principal, por exemplo, o náilon 6 (PA6), indica a presença de seis carbonos a cada ligação com o elemento nitrogênio (CANEVAROLO, 2006 e MANO, 2004).

A Poliamida 6,6 (PA66) é obtida em uma reação de condensação na junção de dois reagentes: a hexametilenidiamina e o ácido adípico, tendo como sub-produto a água. A representação é feita com dois números separados por uma vírgula (6,6), cujo primeiro se refere ao número de carbonos presentes na diamina e o segundo de carbonos presentes no ácido dicarboxílico (CANEVAROLO, 2006 e MANO, 2004). A Figura 5 representa a reação de formação da poliamida 6,6.

Figura 5.: Esquema de reação de condensação para obtenção da PA6,6.

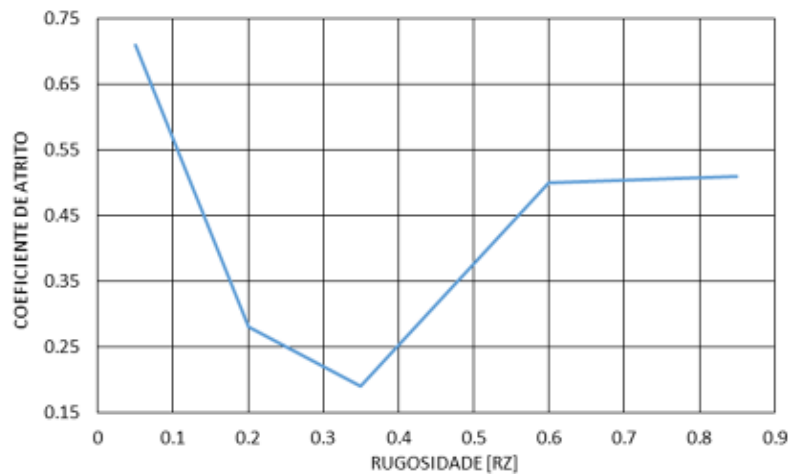


Fonte: Canevarolo, 2006.

O PA66 é considerado um material de engenharia devido a sua alta resistência mecânica (resistência a tração de 83 MPa) e alta rigidez (modulo de elasticidade de aproximadamente 2800 MPa), inclusive a elevadas temperaturas, boa resistência ao impacto, inclusive a baixas temperaturas, boa resistência à abrasão e ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, e excelente comportamento frente à maioria dos agentes químicos. Tem densidade de 1.14 g/cm³, temperatura de trabalho normal na faixa de 80 á 100 °C, porém podendo chegar a picos esporádicos de 150 à 170 °C.(WIEBECK, 2005). Este material é higroscópico e apresenta queda nas propriedades (Limite de escoamento, módulo elástico, e temperatura de transição vítrea) em função da absorção de umidade (LAUNAY, 2011)

O coeficiente de atrito do PA66 vai variar com a rugosidade do contra corpo de aço, conforme Figura 6 (CZICHOS, 1983).

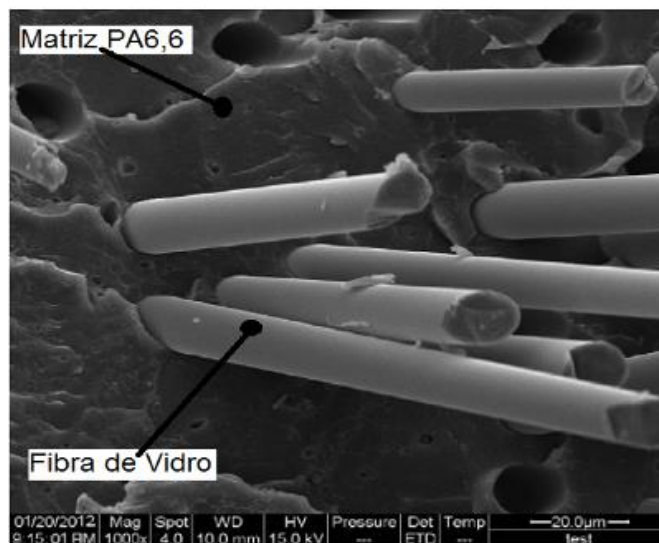
Figura 6.: Coeficiente de atrito do PA66 relacionado com a rugosidade do contra corpo de aço.



Fonte: Czichos, 1983.

A poliamida é utilizada como matriz em compósitos reforçados com fibra de vidro em aplicações estruturais, como anel de atrito do disco de embreagem, calotas de carros, polias de motores elétrico, coletor de ar do motor de automóvel (GUTIÉRREZ, 2014; MANO, 2004 e WIEBECK, 2005). A Figura 7 apresenta uma micrografia da superfície de fratura de um compósito de poliamida 6,6 com 30% de fibra de vidro (PA66GF30).

Figura 7.: Micrografia de um compósito de PA66GF30, (feixe de eletrônico de 15Kv e ampliação de 1000 vezes).



Fonte: Schaeffler Group, 2012.

O Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) com matriz de PA66 tem alta resistência à tração, flexão. A Tabela 1 temos a comparação da propriedade do Polímero PA66 em relação ao Compósito de poliamida 6,6 reforçado com 35% de fibra de vidro (PA66GF35). Observa que o PA66 e o PA66GF35 continuam com a mesma temperatura de fusão e mesma Tg, a densidade estão próximas, porém nota que a resistência a tração e o modulo de flexão do PA66GF35 é mais que o dobro do valor do PA66 (Tabela 1).

Tabela 1.: Comparação das propriedades do PA66 e o PA66GF35.

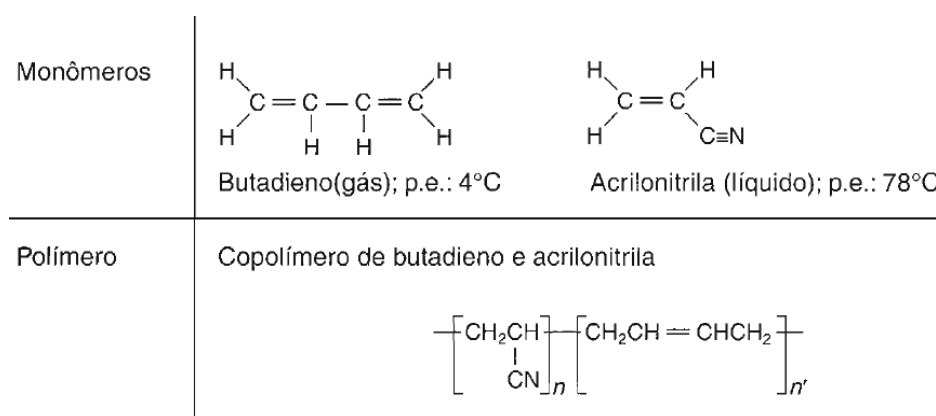
Propriedade	Unidade	PA66	PA66GF35
Temperatura de fusão	°C	260	260
Tg (como conformado)	°C	50-80	50 - 80
Densidade	g/cm ³	1,14	1,35
Resistência à tração (23°C)	MPa	80 a 90	170 - 220
Módulo de Flexão (23°C)	MPa	2800	8900
Flamabilidade (UL 94)		V2 - 0,4	V0 - 0,75

Fonte: (BASF)

2.2.2. Elastômero NBR

A borracha nitrílica NBR (elastômero NBR) é um copolímero de 1,3-butadieno e acrilonitrila (ACN) contendo de 18% a 40% de acrilonitrila, a reação principal de poliadição está esquematizada na Figura 8. Ela é conhecida por apresentar boa resistência aos derivados do petróleo. (CANEVAROLO, 2006). O copolímero pode ser em grande medida linear até altamente ramificado, dependendo das condições de polimerização.

Figura 8.: Esquema de reação de poliadição para obtenção do elastômero NBR.



Fonte: Mano, 2004.

Após a polimerização o mesmo passa por uma vulcanização acrescentando enxofre e negro de fumo, transformando o material em um elastômero, dando a propriedade de resistência química (gasolina, óleos, e gases apolares) e alta aderência aos metais.

Fortemente polar, o grupo de acrilonitrila presente oferece ao elastômero resistência a compostos apolares, com o polibutadieno o polímero adquire uma característica elástica (MAYER et al, 2006).

Dois fatores que limitam o uso deste material são a tendência ao endurecimento na presença de óleos que contêm enxofre, particularmente em elevadas temperaturas (presumidamente devido à forma de vulcanização), e a grande limitação é a sua resistência térmica que é entre 100°C muito abaixo se compararmos com o termoplástico PA66 (BRYDSON, 1999).

A Tabela 2 mostra as propriedades do material NBR com diferentes porcentagens de acrilonitrila ligada e de cargas (majoritariamente negro de fumo) presentes na composição do copolímero e dos parâmetros do processo de vulcanização, tais como temperatura, e porcentagem de aditivos (enxofre, aceleradores, ativadores) utilizados para o controle do processo.

Com o aumento da acrilonitrila no elastômero NBR observa um aumento na sua propriedade mecânica como resistência ao desgaste, dureza shore, modulo de flexão e seu maior alongamento a tração (Tabela 2).

Tabela 2.: Propriedades do Elastômero NBR com diferentes porcentagens de Acrilonitrila.

Propriedades	Unidade	NBR 20%ACN	NBR 27%ACN	NBR 34%ACN	NBR 40%ACN
Temperatura vitria Tg	°C	-60	-	-35	-18
Temperatura máximo de trabalho	°C	100	100	100	100
Densidade	g/cm ³	-	0,92	-	-
Resistência à tração	MPa	13,4	14,2	17,6	17,9
Modulo de flexão	MPa	2,9	3,7	3,9	3,6
Dureza Shore A	-	64	67	67	68
Alongamento	%	387	334	357	466

Fonte: Mark, 1999.

As principais aplicações do NBR são: anéis de atrito de disco de embreagem, mangueiras, gaxetas e revestimento e tanques industriais. O elastômero copolímero butadieno e acrilonitrila (NBR) conhecido como Alpha66 é muito utilizado como material de sacrifício onde se exija um alto coeficiente de atrito.

2.2.3. Compósito de Elastômero NBR com cargas e Fibras de Reforço (Lona de embreagem)

A borracha de NBR combinada com cargas ativas ou reforçante forma um compósito reforçado por trama de fibras: aramida, vidro, acrílico e cobre, permitindo a obtenção de excelentes propriedades físicas e tribológicas, sendo que essas propriedades variam muito com a temperatura de vulcanização e a quantidade e o tipo de reforço introduzido (BAYER, 1993).

A resistência a desgaste abrasivo da borracha NBR formulada com cargas reforçante é cerca de 30% superior à de comparáveis borrachas naturais. Outro fator é que a borracha NBR com cargas reforçadas consegue manter o fator de dureza mesmo com temperaturas variando entre (70°C á 130°C), (BAYER, 1993).

As cargas adicionais à matriz podem ser de enchimento ou abrasivo. As cargas de enchimento são consideradas de baixo custo, cuja finalidade primária é dar volume ao material e reduzir custos, porém sem prejudicar as propriedades funcionais. Cita-se como exemplos o carbonato de cálcio, a vermiculita, e os materiais a base de sílica, como as argilas. Já as cargas abrasivas encontram-se as cargas conhecidas como modificadoras, pois são adicionados para elevar o nível do coeficiente de atrito e remover as partículas impregnadas na superfície de contato fazendo assim uma limpeza na superfície do contra corpo. Dessa forma controlam a sua rugosidade e removem as camadas de óxidos, ou outras camadas que se formam superfície metálica. São exemplos de cargas abrasivas a alumina, o óxido de silício e a barita (BAYER, 1993; RODRIGUES, 2007 e SANTANA, 2009).

Os aditivos são os lubrificantes sólidos, que são adicionados para estabilizar o coeficiente de atrito principalmente em temperaturas mais elevadas. A mais conhecida e utilizada é a grafita (FAULLANT, 2002).

A adição de fibra de vidro melhora a resistência ao desgaste, estabiliza o coeficiente de atrito e aumenta as propriedades mecânicas como a resistência a centrifugação (FERNANDES, 2007 e ROSA, 2012).

Além de cargas de reforço e aditivos presentes na matriz o compósito utilizado neste estudo possui uma trama de fibras longas de reforços que têm por principal finalidade elevar a resistência mecânica à tração do material de fricção. A composição da Lona de embreagem (Schaeffler B-8080) aproximada é de 50% matriz, 20% Fibra de vidro, 10% Fibra de Aramida, 10%Fibra de Acrílico e 10% Fio de cobre. A função destes componentes é:

- Fibras de Aramida: é formada por uma longa cadeia de poliamida sintética, com pelo menos 85% de ligações amina (CONH) em relação ao peso, as ligações são muito alinhadas, ligadas diretamente a dois anéis aromáticos de alta rigidez. Sua função é de aumentar a resistência mecânica.
- Fibras acrílicas são fibras sintéticas formadas pela polimerização em cadeia da acrilonitrila. Quando o teor de acrilonitrila é igual ou superior a 85% do peso, elas são denominadas fibras acrílicas, enquanto se o teor estiver entre 35% e 85% em peso das fibras, elas são denominadas modacrílicas. Tendem a estabilizar o coeficiente de atrito, não deixando variar durante toda a vida útil que esse material estiver, aguentam a temperaturas de 140°C sem muita mudança nas propriedades.
- Fibra de vidro aumenta a dureza do compósito, o coeficiente de atrito a seco e a resistência ao desgaste.
- Fios de cobre são responsáveis para dissipação do calor gerado no momento do trabalho, ou melhor, no momento em que os corpos se atritam, melhora a resistência ao desgaste, ajuda a manter o coeficiente de atrito mesmo em altas temperaturas, isso ocorre graças a produção de óxido de cobre na interface de atrito. (CHAN, 2004)

A fabricação do anel de atrito proposto neste estudo segue a mesma já utilizada para lonas de embreagem, que é realizada em três etapas como evidencia a Figura 9: primeiro é feito um entrelaçamento entre as fibras, seguido de um recobrimento das fibras pela matriz a quente, e ajuste de dimensões por processamento mecânico (BRAZOLIN, 2010 e RODRIGUES, 2007).

Na etapa de entrelaçamento as fibras de reforço e os fios metálicos são mergulhados em uma solução polimérica para ser impregnado em formar uma fita, que na sequência são tramadas, dando a forma circular ao material de fricção (RODRIGUES, 2007).

Na etapa de recobrimento, as peças tramadas são moldadas a quente, com pressão e temperatura controladas. Nessa etapa já é proporcionado ao material uma pré-vulcanização. Essa fase é de fundamental importância, pois é onde o material vulcanizará por completo; ou

seja, será curado para adquirir as propriedades desejadas. A matriz de NBR possui resistência ao desgaste satisfatória, ligam as fibras de reforço umas as outras, as protegem contra danos superficiais, e atuam como uma barreira para minimizar a propagação de trincas (RODRIGUES, 2007).

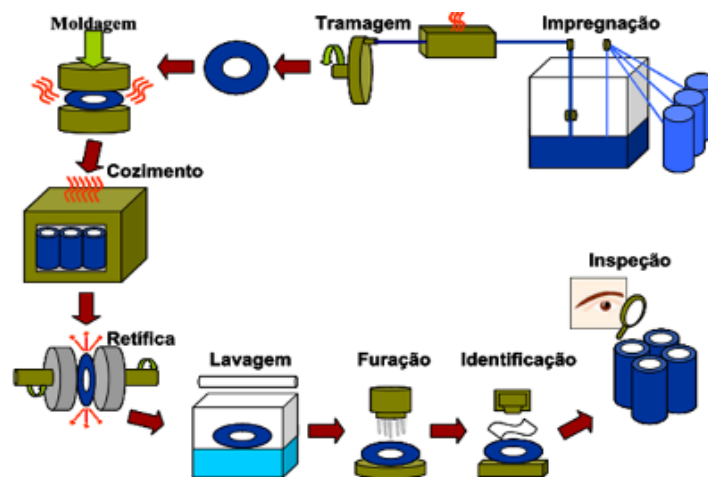
No processo mecânico, o material de fricção é retificado para obter a espessura, o paralelismo e o acabamento superficial conforme especificação. Após passa pelo processo de furação com uma fresa de topo para possibilitar as dimensionais.

Por fim o mesmo vai para uma identificação e controle visual do mesmo garantindo a sua qualidade.

As propriedades químicas, térmicas e mecânicas da lona de embreagem podem variar de acordo com a sua composição e porcentagem de reforço. Um dos reforços mais utilizados para as lonas de embreagem era o asbesto conhecido popularmente como amianto, porém por ser incluído pela Organização mundial da saúde por ser um produto cancerígeno, tendo seu banimento em diversos países. (INCA, 2017)

Devido a esse problema muitas empresas deixaram de utilizar o amianto, substituindo-as por fibras ou cargas em pó de metais como cobre, latão, alumínio e o próprio aço. (KUMAR, 2013). A Figura 9 mostra todo o processo de fabricação da Lona de embreagem.

Figura 9.: Figura do processo produtivo de lonas de embreagens



Fonte: Rodrigues, 2007.

As propriedades mecânicas, térmicas e químicas das matrizes dos compósitos de lona de embreagem são diretamente alteradas com o tipo de fibra ou carga e porcentagem aplicada,

na Tabela 3 fica evidenciada as mudanças de propriedades em relação aos diferentes tipos de reforços e porcentagem.

O que podemos observar na Tabela 3 que independente do tipo de reforço que utilizou, todos adquiriram uma maior resistência mecânica com tração e compressão e resistência térmica com condutibilidade térmica.

Tabela 3.: Propriedades dos compósitos de freios e lonas com reforço de fibra metálica

Propriedades	Fibra de latão			Fibra de cobre			Fibra de aço		
	0%	10%	20%	0%	10%	20%	0	0,1	0,2
Densidade (g/cm ³)	2,14	2,3	2,38	2,14	2,28	2,43	2,154	2,27	2,36
Porosidade (%)	4,05	4,8	5,4	4,05	4,85	5,17	4,05	5,01	5,66
Tensão de ruptura (MPa)	12,14	13,55	13,96	12,14	14,38	16,49	12,14	13,88	13,23
Modulo de Young (GPa)	2,19	2,5	2,61	2,19	2,84	2,96	2,19	2,46	3,31
Tensão em flexão (MPa)	27,38	25,14	21,34	27,38	25,38	25,05	27,38	25,18	25,26
Módulo em flexão (GPa)	5,05	4,8	3,4	5,05	4,45	4,17	5,05	5,01	4,66
Dureza R (escala S)	92±3	91±3	80±5	92±3	93±2	82±5	92±3	90±5	89±3
Compressibilidade (%)	0,68	0,89	1,23	0,68	0,73	1,74	0,68	0,95	2,05
Cond. térmica (W/mK)	1,55	2,11	2,25	1,55	2,3	2,49	1,55	1,98	2,13
Calor específico (J/kgK)	1187	1176	1067	1187	1085	949	1187	1264	1157

Fonte: Kumar, 2013.

2.3. Conceitos Fundamentais em Tribologia

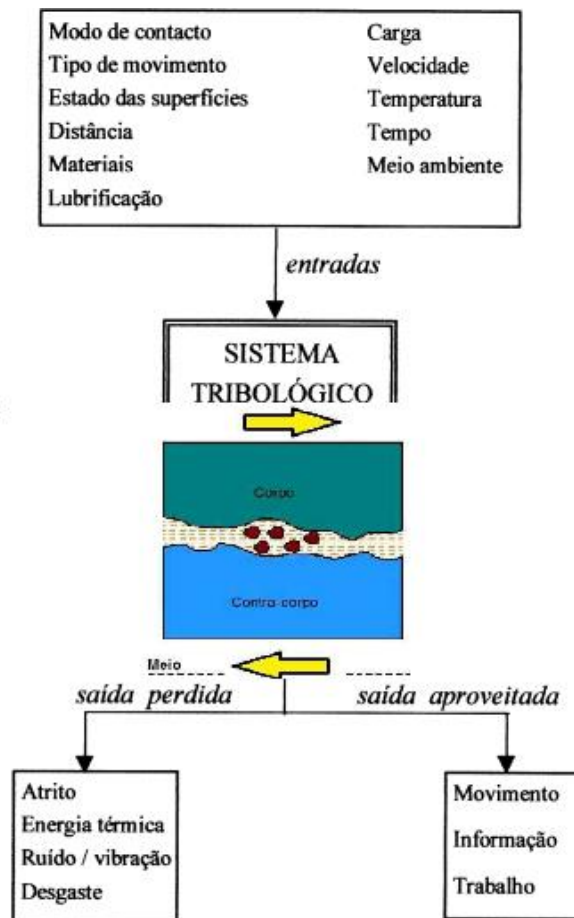
O termo tribologia, tem origem do grego “τριβοξ” (tribos), que significa esfregar ou atritar e definido como a “ciência e a tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo” (HUTCHINGS, 1992). Outra definição publicada recentemente pela OCDE como “a ciência e a tecnologia que se ocupa do contacto entre corpos em movimento relativo e de tudo o que lhe diz respeito”.

Ou seja, qualquer material que sofre atrito e conseqüentemente o desgaste quando em contacto dinâmico com outro. Temos registros das civilizações antepassadas mostrando que há muito tempo estamos trabalhando e estudando esse fenômeno. O termo tribologia ficou publicamente conhecido em 9 de março de 1966, ano que foi publicado pelo governo da Inglaterra o “Relatório Jost”, que estudou a ligação entre o estudo da tribologia e o aumento da eficiência na indústria e o desenvolvimento (JOST, 2005).

Como disciplina científica, a tribologia estuda os fenômenos de atrito e desgaste, que são princípios fundamentais em processos de dissipação de energia e perda de massa quando se tem movimento relativo de sólidos contra sólidos, líquidos ou gases. Tradicionalmente, as perdas devido atrito e desgaste são ignoradas a fim de simplificar modelos físicos, a tribologia como ciência é importante para que se compreenda melhor os fenômenos envolvidos nestes tipos de perdas, estudando os complexos mecanismos microscópicos devido ao contato de superfícies, sendo estes relacionados ao que atualmente se chama de “ciência do caos” (CZICHOS, 1985).

Nestas definições podemos observar desde já, que a área da tribologia é muitovasta, e que abrange problemas de caráter pluridisciplinar e universal, tornando o estudo muito complexo. Define-se Sistema Tribológico ou tribosistema o sistema de corpos em movimento relativo denominados de corpo e contra-corpo, o ambiente que o cerca e suas interações da entrada e saída, apresentados de modo esquemático na Figura 10

Figura 10.: Caracterização das interações de um sistema Tribológico.



Fonte: Silva, 2003.

Podemos citar como características importantes do meio no sistema tribológico a umidade, a temperatura e a sua composição química. São variáveis de entrada a velocidade e o tipo de deslizamento (rotação translação) e a pressão exercida pelo contra-corpo, que é função da força aplicada e da área de contato real entre os corpos.

Do resultado desta interação são produzidos trabalho e transmissão de movimento, e ao mesmo tempo são gerados calor, atrito e perda de material da superfície de contato - (o desgaste). A seguir alguns destes fatores serão descritos em maior detalhe.

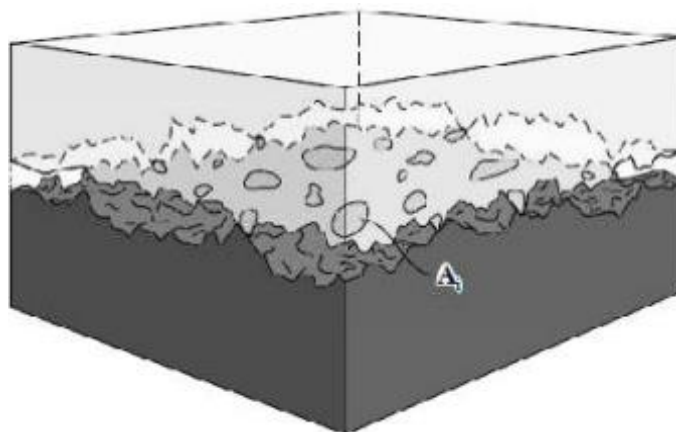
2.3.1. Contato entre superfícies.

Tendo os corpos interagindo entre si, teremos uma área de contato nominal atuando, o contato efetivo acontece em pequenas regiões da superfície do contato. Com isso a força

aplicada e as conseqüentes deformações para suportá-los ficam restringidas, normalmente a estas pequenas áreas de contato real (HUNTCHINGS, 1992).

A explicação para essa condição é que, por melhor acabamento que uma superfície possa apresentar, ela possui descontinuidades, ainda que seja na ordem de distância atômica, resultando em uma superfície irregular com asperezas, que vão inicialmente se tocar quando as superfícies entram em contato. Podemos entender que a área real de contato A_r [mm²], é a somatória de micro áreas, A_i [mm²] (STACHOWIAK, 2001), podemos visualizar e compreender melhor o que está escrito acima na Figura 11.

Figura 11.: Ilustração da pequena área real de contato entre duas superfícies rugosas, onde a somatória de “ A_i ” equivale à área real de contato.



Fonte: Stachowiak, 2001.

2.3.2. Atrito

Há centenas de anos o homem sente um fenômeno onde damos o nome de atrito. De forma direta ou indireta estamos utilizando seu efeito, sempre que transmitindo um movimento através de correias, polias, travando um carro ou mesmo quando simplesmente estamos andando (HERSKOWICZ, 1993).

Em ciências dos materiais, podemos definir atrito de uma forma mais resumida possível, como uma fricção entre duas superfícies, onde isso ocasiona certa resistência ao movimento. Colocando o mesmo de uma forma mais completa, o atrito é um estado de aspereza ou rugosidade entre dois sólidos em contato, que permite a troca de forças em uma direção tangencial à região de contato entre os sólidos (HUTCHINGS, 1992).

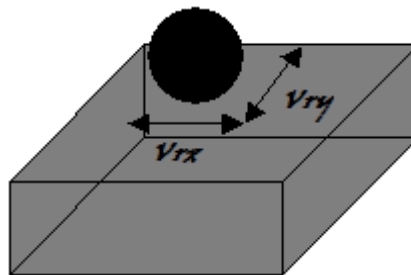
Segundo Igartua e Conte (2012), o atrito é um processo de dissipação de calor e transferência de massa termodinamicamente irreversível. Pode ser definido como a força resistiva que um corpo encontra ao se mover sobre outro (HUTCHINGS, 1992).

Basicamente o atrito pode ser de três formas, primeira por contato por escorregamento, segundo contato por rolamento, e terceiro por uma combinação desses modos de contato que é conhecido pelo nome de contato por rotação. No presente trabalho o interesse do atrito e do desgaste está direcionado para o modo de escorregamento.

O contato por escorregamento também conhecido como deslizamento ocorre devido ao surgimento de deslocamento linear relativo, verificada no plano tangente comum, plano x, y, entre as duas superfícies no ponto de contato instantâneo, como ilustra a Figura 12.

Em média, a força requerida para manter o escorregamento em movimento é bem menor do que a necessária para iniciá-lo, Figura 12.

Figura 12.: Esquema ilustrando de contato por escorregamento.



Fonte: Rossino, 2008.

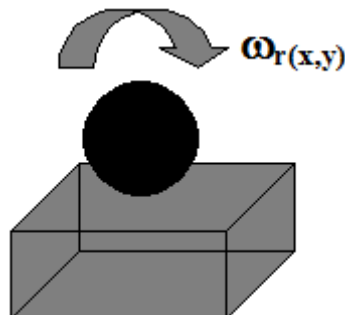
O contato por rolamento ocorre devido à resistência ao movimento que ocorre quando um objeto rola sobre uma superfície em contato. Ocorre em caso distinto, quando o corpo tem uma superfície lisa com alta precisão geométrica, como ilustra a Figura 15, (HUTCHINGS, 1992).

Em média, a força requerida para manter o rolamento é bem menor do que a necessária para iniciá-lo, de modo que o coeficiente dinâmico de atrito por rolamento é menor do que o estático (HERSKOWICZ, 1993).

O termo atrito por rolamento, entretanto, é normalmente restrito a corpos com forma aproximadamente perfeita, com tolerâncias dimensionais podendo chegar a centésimo de milésimo (1×10^{-5} mm), e com asperezas superficiais muito pequenas. Nesse caso, a componente da força de atrito devido à rugosidade é muito pequena e, conseqüentemente,

verificam-se forças de atrito extremamente baixas, com coeficiente de atrito geralmente na faixa de 5×10^{-3} a 5×10^{-5} , Figura 13, (CONTE, 2012 e ROSA, 2012).

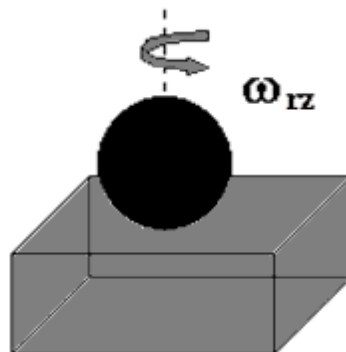
Figura 13.: Esquema ilustrando de contato por rolamento.



Fonte: Rossino, 2008.

O contato por rotação ocorre devido ao surgimento de deslocamento rotativo tangente ao eixo z, e se deslocando linearmente nos planos x e y, entre as duas superfícies no ponto de contato instantâneo, ou seja, é a combinação do deslocamento de escorregamento junto com o deslocamento por rolamento, como ilustra a, Figura 14, (CONTE, 2012 e HUTCHINGS, 1992).

Figura 14.: Esquema ilustrando de contato por rotação.



Fonte: Rossino, 2008.

O primeiro a formular relação matemática para a fricção foi Leonardo da Vinci em 1493, a primeira lei estabelece que a força tangencial F_t necessária para iniciar ou sustentar um movimento relativo entre dois corpos é proporcional à força normal F_n que pressiona as superfícies em contrato conforme Equação 01 (BHUSHAN,1991 e HUTCHINGS, 1992):

$$Ft = \mu \times Fn$$

equação 01

Onde μ é o coeficiente de atrito para um dado par de materiais. O coeficiente de atrito é dito estático quando a força aplicada Ft deve iniciar o movimento, e pode ser maior que o coeficiente de atrito dinâmico, medido quando a força mantém o movimento entre os corpos, em uma superfície com inclinação θ , como mostra a Equação 02 (BHUSHAN, 1991).

$$\mu = \tan \theta$$

equação 02

Ao longo do tempo, foram estabelecidas algumas leis do atrito. Muitas delas são úteis para vários modelos, como o de corpo rígido, mais estão longe de abranger a complexidade da realidade com diferentes materiais, parâmetros e variáveis que se mostram relevantes (HERSKOWICZ, 1993 e HUTCHINGS, 1992).

Modelos mais recentes atribuem o atrito a dois mecanismos principais a deformação (envolvendo o arraste de asperezas da superfície mais duras através do material mais macio) e a adesão (que envolve as junções formadas na interface devido às ligações secundárias que ocorrem os corpos) (LUDEMAR, 1996)

Vários cientistas têm procurado explicar os mecanismos do atrito através dos fenômenos de energia interatômicos, relacionando-os com os estados de instabilidade energética (excessiva) na superfície de um sólido, ao contrário do equilíbrio conseguido no seu interior. Esta energia da superfície é responsável pelos fenômenos de adsorção, adesão, reações químicas, coeficiente de atrito, aparecimento do efeito de capilaridade, etc., verificados na interface, (BOWDEN, 2011).

A energia da superfície depende da natureza e da estrutura dos sólidos, e é devida principalmente a descontinuidades da rede cristalina, imperfeições cristalográficas, mudanças de fase ou composições heterogêneas, a energia da superfície está associada à tensão superficial (CALLISTER, 2006).

Apesar de estudos posteriores mostrarem que ambas, os componentes não são totalmente independentes, tratá-los assim, é útil para facilitar o entendimento dos fenômenos e dos mecanismos envolvidos (HUTCHINGS, 1992). A relação é mostrada na Equação 03, Componentes do coeficiente de atrito conforme modelo de Bowden, 2011 (Figura 15).

Figura 15.: A) Componente de adesão μ_a e o B) Componente de deformação μ_d .



Fonte: Elaboração própria

Onde:

$$\mu = \mu_a + \mu_d$$

equação 03

A força de atrito para superfície não excessivamente lisas ou rugosas, seria a força necessária para cisalhar as junções formadas devido ao carregamento normal. Assim, considerando a tensão cisalhante τ_c e a área real de contato, A_r , pode-se deduzir que a força de atrito é dada pela Equação 04. A força de atrito é proporcional somente à área de contato real, pois para superfícies com distâncias acima de 1nm as forças adesivas são extremamente pequenas e não contribuem de modo significativo no atrito (Person, 1999).

$$F_{at} = \tau_c \times A_r \tag{equação 04}$$

A norma ASTM G40 (2005) define desgaste como “dano a uma superfície sólida, geralmente envolvendo progressiva perda de material, devido ao movimento relativo entre esta e uma superfície de contato”. Em sistemas tribológico bem projetados a remoção de material é usualmente um processo muito lento, porém muito presente e contínuo (BHUSHAN, 1991).

O atrito gerado pelo movimento entre partes móveis é a maior causa de desgaste e dissipação de energia. De forma geral o desgaste pode ser definido como uma mudança cumulativa e indesejável em dimensões motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato, e com movimento relativo, devido á predominantemente ações mecânicas (HERSKOWICZ, 1993).

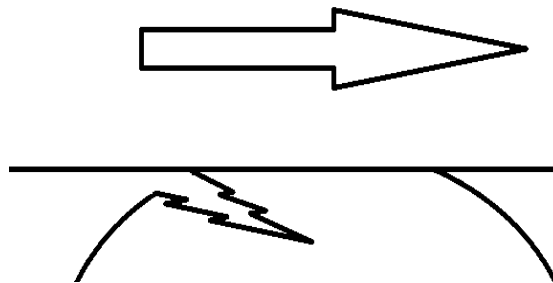
2.3.3. Desgaste

O desgaste é um processo complexo, podendo envolver as interações físicas e químicas nas superfícies de contato e é tipicamente classificado de duas maneiras: pelo modo e pelo mecanismo.

O mecanismo de desgaste é a classificação do processo pelo qual o material é removido da superfície de contato. O estudo dos processos de desgaste também é parte da disciplina de tribologia. Os principais mecanismos de desgaste, de acordo com a norma (DIN50320,1979) são:

- **Desgaste adesivo:** No momento que duas superfícies ficam em contato direto devido a certa carga de tal maneira que alguns pedaços rígidos em contato poderão grudar uma as outras devido a força entre os átomos das superfícies destes materiais possuem. Ocorrendo um movimento de deslizamento entre elas, as asperezas desta superfície tendem a quebrar e partes deste micro pedaços aderem a uma das superfícies e outra parte pode causar riscos nas superfícies. Conforme Figura 16.

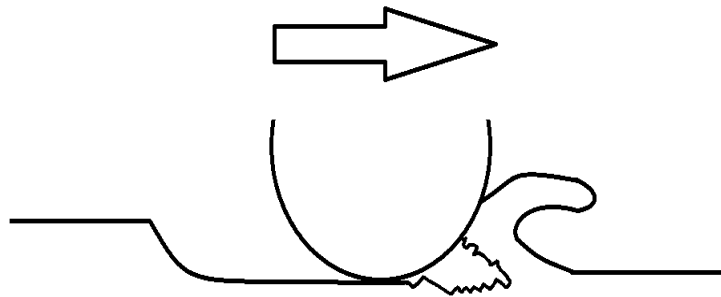
Figura 16.: Desenho esquemático do modo representativo de desgaste adesivo.



Fonte: Rossino, 2008.

- **Desgaste abrasivo:** Acontece no momento que dois materiais com durezas opostas estão em movimento relativo como o deslizamento, ocorrendo uma perda de material do corpo mais mole para o mais rígido, isso ocorre devido as partículas mais duras e rugosas deslizarem sobre uma superfície mais mole, no mesmo corpo gera ranhuras e assim tira pedaços do corpo com menor dureza. Conforme Figura 17

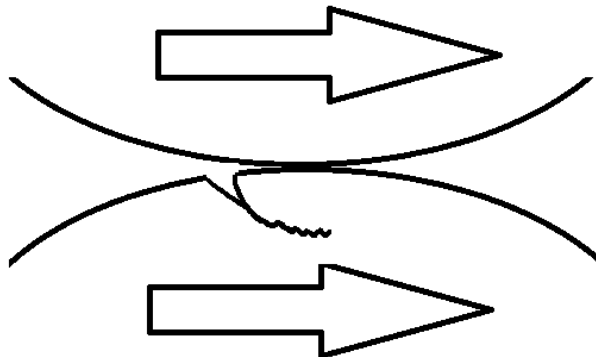
Figura 17.: Desenho esquemático do modo representativo de desgaste abrasivo.



Fonte: Rossino, 2008.

- **Desgaste por fadiga superficial:** Diante de superfícies em contato, devido à ação de uma carga de compressão em um movimento de rolamento, aparece tensão de contato. Esta produz tensões de cisalhamento cujo valor máximo ocorre próximo a superfície. Tensões pelo qual acontece a chamada fadiga superficial. Conforme figura 18

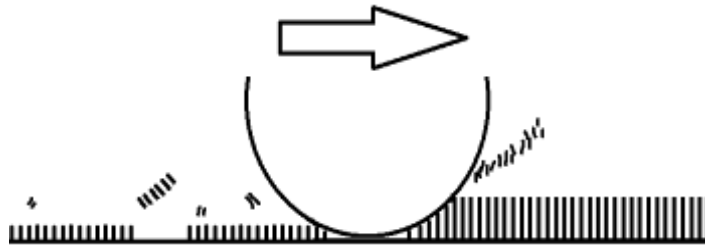
Figura 18.: .Desenho esquemático do modo representativo de desgaste por fadiga.



Fonte: Rossino, 2008.

- **Desgaste corrosivo:** Com a quebra da superfície pelo movimento de deslizamento, o metal fica exposto ao ambiente corrosivo, facilitando o desgaste no momento que temos a continuidade do movimento. Há um inibidor deste fenômeno, o lubrificante previne e protege o elemento contra esse desgaste corrosivo. Conforme Figura 19

Figura 19.: Desenho esquemático do modo representativo de desgaste corrosivo.



Fonte: Rossino, 2008.

O mecanismo de desgastes não acontece de modo isolado um do outro, mais sim com dois ou mais tipos de desgaste ao mesmo tempo, em uma situação que o produto está envolvido diretamente com o desgaste, é muito válido o conhecimento dos tipos de desgaste atuando diretamente no sistema de tribológico.

Um dos fatores fundamentais é como quantificar o desgaste das superfícies, onde permita a comparação com valores encontrados em outras pesquisas. Um dos modelos de desgastes mais utilizados é o de Archard (1953).

O modelo de Archard (1953) propõe que o contato entre os corpos se dá através de interações entre as asperezas, onde a área de contato real, A_r [m²], é proporcional ao carregamento, e com valor igual à soma das várias pequenas áreas ($\sum A_i$). Como o deslizamento terá contato entre as asperezas quando uma passar sobre a outra.

A principal conclusão do modelo é que o desgaste é proporcional ao carregamento e independe da área nominal de contato, mantendo relação inversa com a dureza do material mais mole conforme a Equação 05 (ARCHARD, 1953).

$$Q = K \frac{F_n}{H} \quad \text{equação 05}$$

Nesta equação o Q corresponde á taxa de volume desgastado por distância de deslizamento [m³/m], o K é o coeficiente de desgaste adimensional, o F_n corresponde ao carregamento normal [N] e por ultimo o H representa a dureza da superfície mais moles entre os materiais em contato [Pa].

Na equação de Archard (1953) obtemos o coeficiente de desgaste adimensional, com ele podemos caracterizar a severidade do desgaste e de comparar sistemas tribológicos (STACHOVIK, 2001). O termo K mostrado na equação pode ser encontrado como [m³/Nm], no qual obtemos na razão de K/H (HUTCHINGS, 1992).

2.4. Comportamento em desgaste dos materiais de atrito da embreagem

O sistema tribológico no amortecedor torcional é composto do anel de atrito e um contra-corpo metálico, o meio é o ar e não há introdução de fluidos. Pode-se considerar o sistema como sendo o de atrito seco por escorregamento. Partículas geradas durante a fricção ficam aprisionadas no sistema e podem interagir no processo de desgaste.

O anel de atrito é um compósito de matriz polimérica, com baixa condutividade térmica. Durante o deslizamento contra as partes metálicas, parte da energia é transformada em calor, o que conseqüentemente aumenta a temperatura de trabalho deste sistema tribológico.

A temperatura é um fator de variância, durante os testes de desgaste. Conforme discutido por Laranjeira (2011), nos polímeros o efeito da temperatura é muito importante e depende das condições do ensaio e do calor gerado por atrito na interface, em que a dissipação de energia por atrito na zona de contato provoca um aumento da temperatura. O calor gerado por atrito é um fator muito importante, uma vez que interfere nas propriedades mecânicas e estabilidade do polímero. A viscoelasticidade como as demais propriedades podem mudar de acordo com o aquecimento do material gerando o amolecimento do polímero. Quanto maior a pressão específica, ou a temperatura mais rápida o material irá amolecer ou até mesmo degradar.

No caso do atrito quanto maior a temperatura maior será seu coeficiente de atrito já que o material passa a ser mais “borrachoso”, ao contrario de seu desgaste que ocorrerá de forma exponencial a sua temperatura (LARANJEIRAS, 2011).

Embora o atrito e o desgaste de sólidos não metálicos apresentem algumas similaridades fundamentais como os metais, existem também diferenças significativas nos mecanismos de desgaste envolvidos bem como no nível de atrito ou desgaste que ocorre (STACHOWIAK, 2001).

Nos polímeros o atrito e o desgaste são extremamente complexos e dependem da natureza da aplicação e das propriedades dos materiais. Mesmo os polímeros reforçados têm valores de módulos de elasticidades menores que os do metal. O atrito metal - polímero é caracterizado pelos mecanismos de adesão e deformação resultantes da força de atrito que não são proporcionais à carga, pois o aumento desta provoca a diminuição do atrito; mas esse fenômeno é proporcional à velocidade (SENATORE, 2011).

A relação entre o módulo de elasticidade (E) e a dureza do material (H) determina a extensão ou o índice de plasticidade (Ψ) na região do contato. Os metais apresentam índice de plasticidade (Ψ) da ordem de 100 ou mais, enquanto a maioria dos polímeros é da ordem de 10. Isto indica que o contato é predominantemente elástico, com exceção da existência de rugosidade muito elevada, quando pelo menos uma das superfícies de contato é um polímero (HUTCHINGS, 1992).

O material de sacrifício polimérico que estamos estudando sofrerá um atrito por escorregamento contra um metal, devido ao tipo de atrito tende a ocorrer um desgaste do tipo abrasivo e adesivo.

Como já vimos os principais fenômenos de desgaste são; adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica. (DIN50320, 1979). Para os materiais poliméricos o processo de desgaste pode ser tratado como coesivo e interfacial, no processo coesivo temos os mecanismos de abrasão e deformação plástica, o desgaste é a resultante da abrasão associada à deformação plástica do polímero, ou por crescimento da trinca na região deformada. No processo interfacial a adesão com a reação triboquímica, esse desgaste é a resultante da adesão entre as superfícies e a deformação ocorre apenas na superfície do polímero.(BRISCOE, 1981).

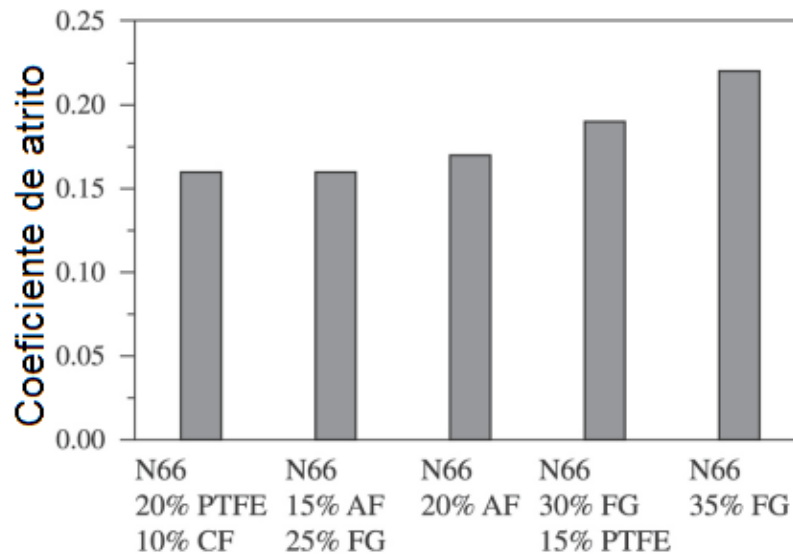
2.4.1. Comportamento do PA66

Algumas referências foram utilizadas para comparar os resultados obtido em testes anteriores (ROSA, 2012 e ROSA, 2014) e o valor já encontrado por outros autores. A poliamida é muito utilizada como matriz polimérica, podendo ter seu reforço em proporção e tipo variado. Os exemplos a seguir mostram a influência:

- a) do tipo e da porcentagem de reforço introduzida no material,
- b) do efeito da existência de lubrificante,
- c) da rugosidade da superfície do contra-corpo,
- d) do material metálico utilizado como contra-corpo.

A Figura 20 podemos observar que há uma tendência de aumento do coeficiente de atrito com o aumento da fração volumétrica de fibras de reforço, mas o coeficiente de atrito varia entre 0,15 a 0.17 (ROSA, 2014), a seco, contra uma superfície de aço retificada.

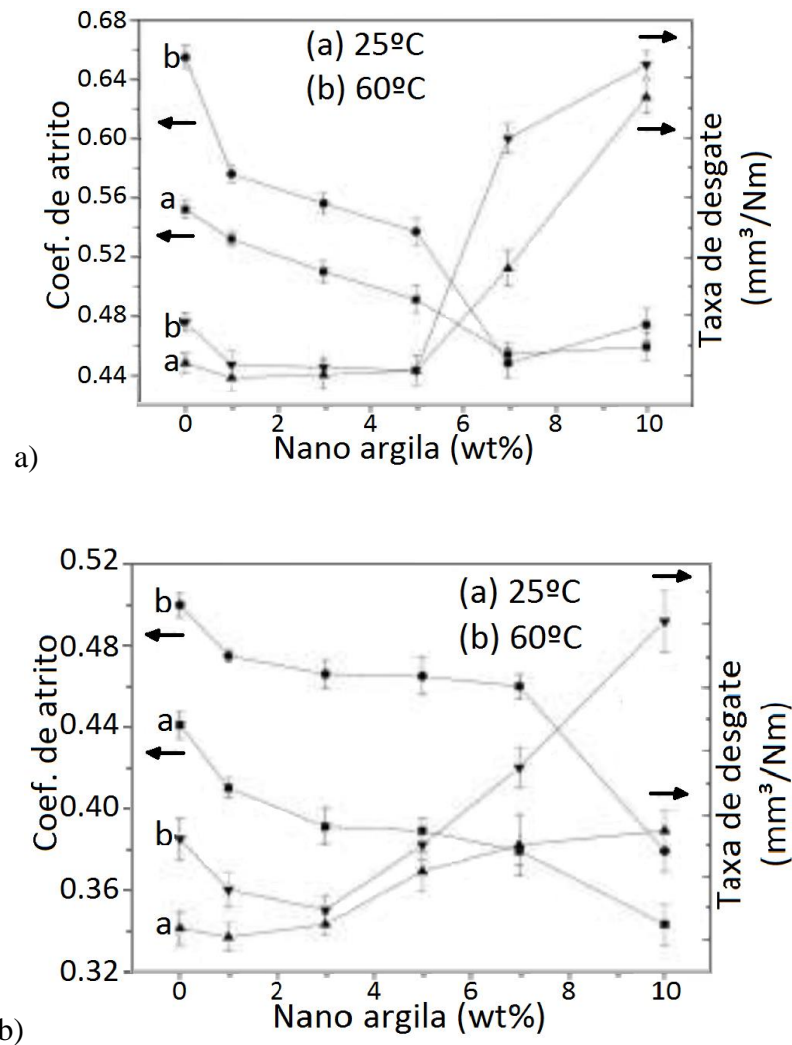
Figura 20.: Comportamento do Coeficiente de atrito nos Compósitos de Nylon. Coeficiente de atrito medido após uma estabilização de 20.000 ciclos, sobre uma velocidade de 14.05 metros por minuto, com uma carga de 600 N.



Fonte: Rosa, 2014.

BO Mu (2007) estudou o efeito do acréscimo de nano argilas como reforço na matriz polimérica de poliamida 66. Esses testes foram realizados sobre uma velocidade constante de 0.6 metros por segundo e com cargas de 5N e 10N (Figuras 21a e Figuras 21b). A tendência é que o coeficiente de atrito caia proporcionalmente com a porcentagem de carga de nano argila acrescentada, para as duas cargas estudadas. O aumento da temperatura de trabalho elevou o valor do coeficiente de atrito independente da carga de argila adicionada e da carga aplicada. Ao mesmo tempo o desgaste é baixo até uma carga de 5%, após esse valor o material tende a aumentar a taxa de seu desgaste consideravelmente, explicáveis devido ao aumento da temperatura estar ligado diretamente com a dureza do PA66, amolecendo o material e deixando com uma dureza menor (BO MU, 2007).

Figura 21.: Comportamento Desgaste e atrito do PA66 com diferentes quantidades de reforço de nano de argila sob uma carga de a) 5N; b) 10 N.



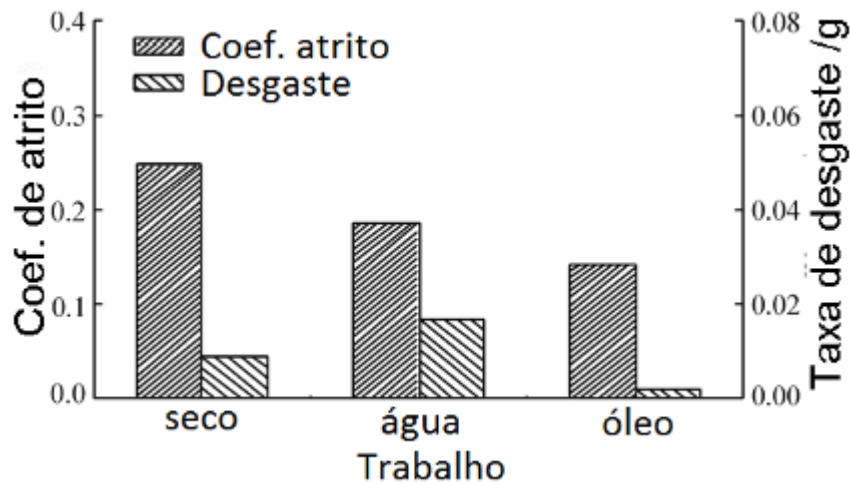
Fonte: BO Mu, 2007

Zhang (2012) estudaram a influência da lubrificação e da porcentagem de fibras de reforço no atrito e taxa de desgaste de compósitos PA66 + fibra de vidro (Figura 22 e Figura 23). Podemos notar que o coeficiente de atrito é maior quando não temos nenhum tipo de lubrificação, ou seja, o trabalho a seco.

Porém em relação ao desgaste temos uma variação, dependendo os tipos de lubrificação, em meio aquoso a taxa de desgaste é maior do que a seco e em óleo (Zhang, 2012).

Devido às poliamidas serem materiais higroscópicos, o ensaio com lubrificação aquoso fez com que o compósito de poliamida inchasse, com isso elevou a sua taxa de desgaste (ZHANG, 2012).

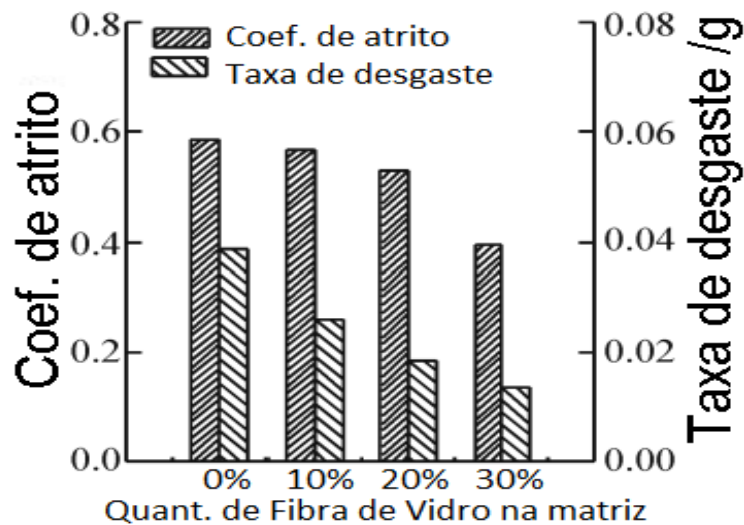
Figura 22.: Comportamento do Desgaste e atrito do PA6 com fibra de vidro, trabalhando com e sem lubrificação.



Fonte: Zhang, 2012

No mesmo artigo Zhang (2012) evidencia a diminuição do coeficiente de atrito e do desgaste a seco quando aumentamos a porcentagem de fibra de vidro no compósito de poliamida (Figura 23). Essa tendência fica muito nítida quando observamos apenas o desgaste: o material com 30% de fibra apresenta uma queda para menos da metade no desgaste comparado com a matriz sem reforços.

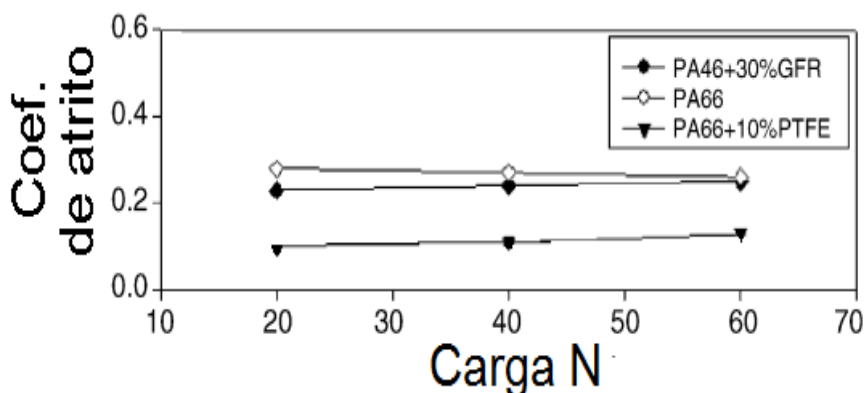
Figura 23.: Comportamento do Desgaste e atrito do PA6 com diferentes porcentagens de fibra de vidro no trabalho a seco.



Fonte: Zhang, 2012

Unal (2006) também compara a questão de diferentes tipos de reforço na matriz e, assim como observado no gráfico anterior, a matriz possui sempre um coeficiente de atrito maior que os com reforços. Aqui também foi observada uma redução do coeficiente de atrito com a adição de fibras de vidro, mas a diferença caiu quando se aumentou a carga de 20 para 60 N. Estes autores também compararam o comportamento em atrito de uma blenda PA e politetrafluoretileno (PTFE); com a adição de PTFE o atrito diminuiu mais da metade. Isso se deve ao fato do teflon ser um ótimo lubrificante sólido (Figura 24).

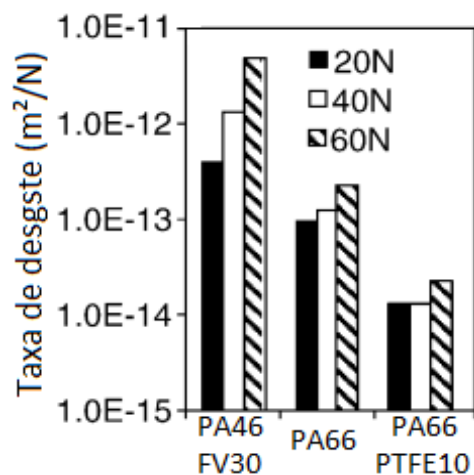
Figura 24.: Comportamento do atrito do PA com fibra de vidro e teflon, trabalhando a seco.



Fonte: Unal, 2006

A Figura 25 mostra os resultados de desgaste dos mesmos materiais, sofreram uma variação maior do que o coeficiente de atrito e de forma geral o desgaste aumenta com a carga aplicada (UNAL, 2006). Contrário às observações de Zhang(2012) a matriz com fibra apresentou desgaste maior do que os demais materiais. No compósito que possui reforço de PTFE observa-se uma taxa de desgaste muito inferior que as demais e a diferença de desgaste entre as cargas aplicada a parecer apenas para a carga de 60N.

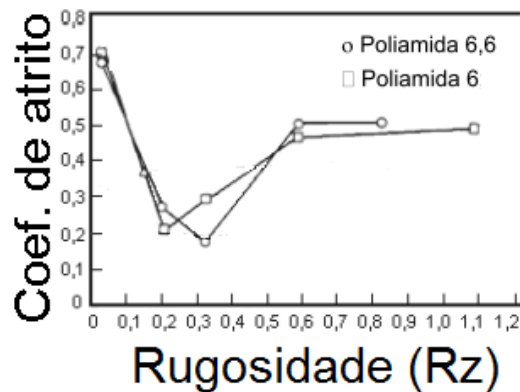
Figura 25.: Comportamento do Desgaste do PA com fibra de vidro e teflon, trabalhando a seco.



Fonte: Unal, 2006

Em trabalho de Czichos (1983), (figura 26), observou-se que a rugosidade do material de contra - corpo é um fator que influencia diretamente no resultado do coeficiente de atrito. (BOWDEN, 2012 e HUTCHINGS, 1992), mostram que o sistema de atrito é composto pelo atrito por adesão mais o atrito de deformação. A diferença de coeficiente de atrito é que no momento que não temos nenhuma rugosidade, prevalecerá um atrito por adesão, com isso teremos um alto valor de coeficiente de atrito. Porém no momento que acrescentam uma pequena rugosidade que no caso é 0,1 á 0,2 Rz, acontece um alívio na área de contato, ou seja, o atrito por adesão tende a diminuir drasticamente, portanto a tendência do coeficiente de atrito é cair, conforme mostra no gráfico 28. Aumentando a rugosidade acima dos 0,2 Rz a tendência é aumentarmos o coeficiente de atrito, pois com a rugosidade maior começa a aparecer o atrito por deformação. Os dois materiais de sacrifício PA66 e PA6 apresentaram uma curva de coeficiente de atrito parecida, deixando explícito que o principal motivo da variação deste coeficiente de atrito é a rugosidade.

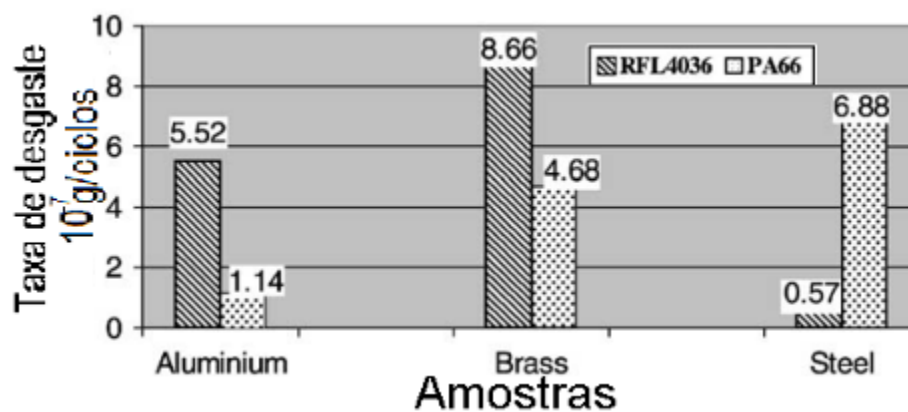
Figura 26.: Comportamento do atrito do PA em relação a rugosidade do contra corpo de aço, trabalhando a seco.



Fonte: Czichos, 1983

No trabalho de Chen (2003), (Figura 27), temos como materiais de sacrifício, o polímero poliamida 66 ou o compósito de poliamida 66 reforçado com 35% de fibra de vidro e 15% de teflon nomeado pela sigla RFL4036. Foi estudada a influência do tipo de contra-corpo: aço, alumínio ou bronze. Observou-se que cada material comporta se de maneira totalmente diferente: enquanto o reforço melhorou a resistência ao desgaste no contra corpo de aço, piorou contra o contra - corpo de bronze ou de alumínio.

Figura 27.: Taxa de desgaste do PA66 e do PA66 com 35% de FV e 15% de PTFE (RFL4036) nos contra corpos aço, alumínio e bronze.



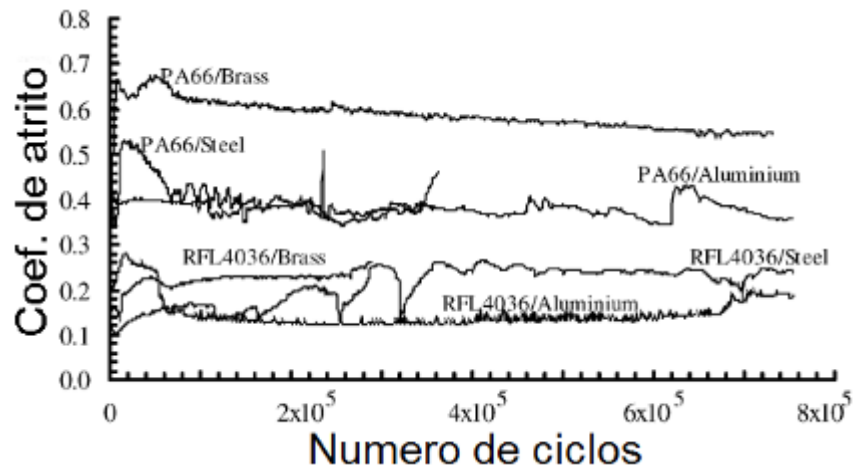
Fonte: Chen, 2003

No mesmo trabalho do Chen (2003), mostra o gráfico do coeficiente de atrito relacionando os mesmos materiais PA66 e RFL4036 nos contra corpos aço alumínio e bronze. O coeficiente de atrito do compósito tende a ser menor comparado com o PA66 sem reforços.

O motivo dessa diferença deve-se ao PTFE adicionado no compósito. Segundo Faillant (2000) o Politetrafluoretileno é um dos principais lubrificantes sólidos utilizados, e atua na redução do coeficiente de atrito e do desgaste entre superfícies deslizantes.

Observou-se também que o bronze tende a dar um coeficiente de atrito maior que os demais contra corpos testados. Devido ao bronze apresentar grande quantidade de partícula de desgaste durante o ensaio, gerando atrito extra por deformação. (Figura 28)

Figura 28.: Comportamento do Desgaste e atrito do PA6 com fibra de vidro.



Fonte: Chen, 2003

De modo geral podemos inferir dos trabalhos mostrados, o efeito de algumas variáveis sobre o desgaste e atrito do PA66 com fibras de reforço:

A) Efeitos da adição de reforços no coeficiente de atrito e desgaste:

Podemos observar os autores Rosa (2014); Unal (2006) e Chen (2003) que o coeficiente de atrito tem uma tendência a ser maior com a adição de fibra de vidro. Apenas no estudo de Zhang (2012) o aumento do teor de fibra diminuiu o coeficiente de atrito. A adição de lubrificantes sólidos ao compósito (UNAL, 2006; CHEN, 2003) e de nano argilas (BO MU, 2007) reduz bastante o coeficiente de atrito.

Quanto ao desgaste, Unal (2006) e Chen (2003) mostram que ele sofre influência do tipo de reforço colocado na matriz, mas a lubrificação e o tipo do material do contra corpo de atrito podem modificar totalmente o desempenho do material.

B) Efeito da presença de lubrificante:

Segundo o trabalho de Zhang (2012) podemos verificar que quando temos um lubrificante líquido entre os ensaios tribológicos, o coeficiente de atrito tende a cair compararmos ao coeficiente de atrito do ensaio a seco. Porém no desgaste o trabalho com lubrificação pode aumentar o desgaste como mostra o caso da lubrificação de água ou diminuir o desgaste como no caso da lubrificação a óleo.

C) Efeito da rugosidade da superfície do contra - corpo:

No trabalho do autor (CZICHOS, 1983) nota-se a mudança predominante do tipo de atrito, quando temos uma rugosidade próxima do zero apresenta um atrito por adesão com isso o coeficiente de atrito é alto na rugosidade até 0,1Rz, porém entre 0,1Rz até 0,3Rz gera um baixo coeficiente de atrito, e para um Rz maior que 0,3 temos um aumento no coeficiente de atrito até chegar em 0,7 Rz e ter a estabilização do seu coeficiente, neste caso teremos o atrito por deformação predominante.

D) Efeito da carga aplicada:

Nos trabalhos dos autores BO Um (2007) e Unal (2006) nota-se que uma maior carga tem tendência a aumentar o desgaste.

Para o coeficiente de atrito o trabalho de BO Um (2007) mostra que aumento da carga tende a diminuir o coeficiente de atrito. Porém no trabalho de Unal (2006) o aumento da carga da amostra tende a aumentar coeficiente de atrito, com exceção a fibra de vidro que parece estar estabilizada independente da carga.

E) Efeito da temperatura

O autor BO Um (2007) mostra a temperatura influenciando diretamente no coeficiente de atrito e no desgaste, tendo uma tendência de um aumento no coeficiente de atrito e no desgaste, para a temperatura mais elevada.

2.4.2. Comportamento do Elastômero NBR

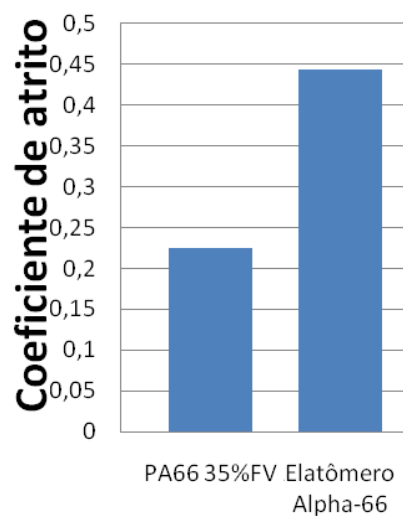
O elastômero NBR é muito utilizado como vedações e elemento de atrito, podendo ter seu trabalho diversificado em diversos locais. O Elastômero possui um comportamento

diferente dos compósitos, por ser apenas borracha sem reforço, tende a ter maior desgaste que os demais. Os exemplos a seguir mostram a influência:

- a) do efeito da existência de lubrificante,
- b) da temperatura do trabalho,
- c) do material metálico utilizado como contra-corpo,
- d) da porcentagem de acrilonitrila introduzida no material,
- e) da porcentagem de cargas e polímeros estudado com o NBR.

Em ensaios anteriores Rosa (2012), observou -se que em pares de atrito contra o aço, o elastômero NBR (Alpha 66) tem coeficiente de atrito maior do que o compósito de poliamida 66 reforçado com fibra de vidro. (Figura 29).

Figura 29.: Comportamento do Coeficiente de atrito do Elastômero NBR (Alpha 66) e do Aço.

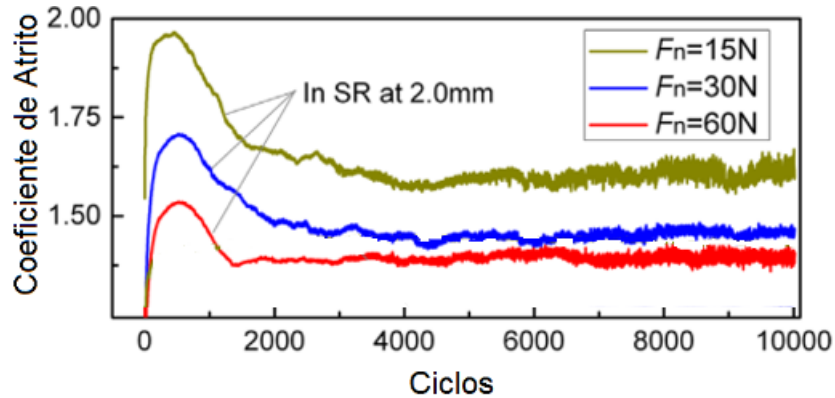


Fonte: Rosa, 2012

Shen (2016) analisou as propriedades de um NBR comercial, comprado na Parker seal company (USA) com acrilonitrila entre 18% a 50%, nos ensaios de atrito sob fretting, e deslizamento contínuo. A Figura 30 mostra a curva de coeficiente de atrito em deslizamento contínuo (contra corpo de aço AISI 321) em função do número de ciclos para três tipos de cargas. Nos três casos o material precisou de uma quantidade de ciclos para ter sua estabilidade de fricção, no caso da figura 30a quantidade de ciclos independente da força é de aproximadamente 1500 ciclos. Observa-se também que quanto maior a carga aplicada no

sistema menor é o coeficiente de atrito, essa proporção persiste independentemente da quantidade de ciclos.

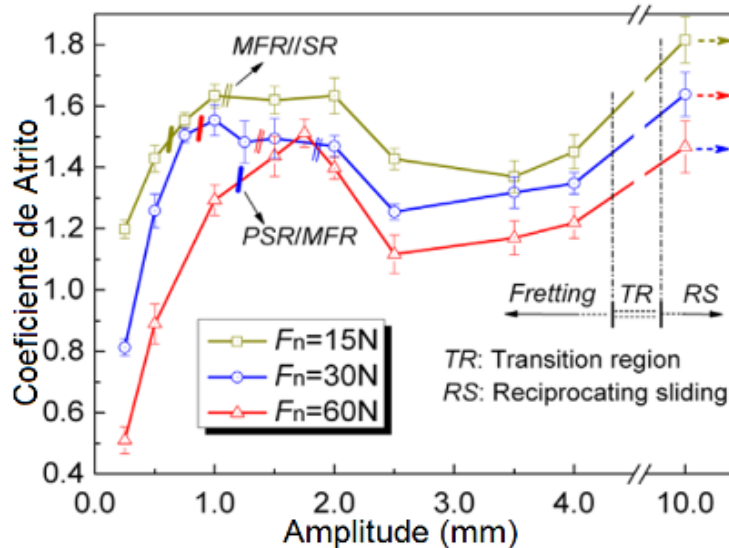
Figura 30.: Variação do coeficiente de atrito em ensaio de atrito sob amplitude de 2mm.



Fonte: Shen, 2016

Outra variação pertinente observada pelo Shen (2016) foi a diferença no coeficiente de atrito quando alteramos o percurso de fricção, de contínuo para cíclico. No regime de baixa amplitude observa-se o fenômeno de fretting. No Figura 31 observa-se um gráfico que independente da amplitude o coeficiente de atrito tende a ser menor para cargas maiores. Dentro do regime de fretting, entre a amplitudes de 1 e 2 mm, ocorreu um pico no coeficiente de atrito. Após 4 mm de amplitude mostra-se a tendência a aumento do coeficiente de atrito.

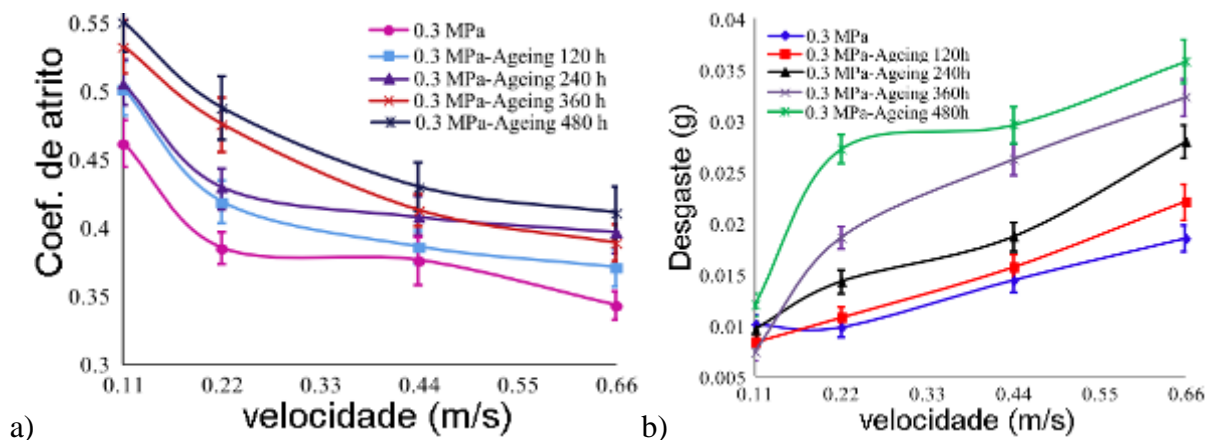
Figura 31.: Gráfico de Amplitude em relação a Coeficiente de atrito



Fonte: Shen, 2016

Dong (2015) estudou a propriedade da borracha NBR em trabalho de pino disco no contra corpo aço inoxidável (1Cr18Ni9Ti) variando a velocidade e estudando a influência do envelhecimento térmico sobre o desgaste e atrito (Figura 32). Com o aumento da velocidade de deslizamento diminuiu o coeficiente de atrito aumentou o desgaste. O envelhecimento a 80°C aumentou o coeficiente de atrito, assim como o desgaste do material.

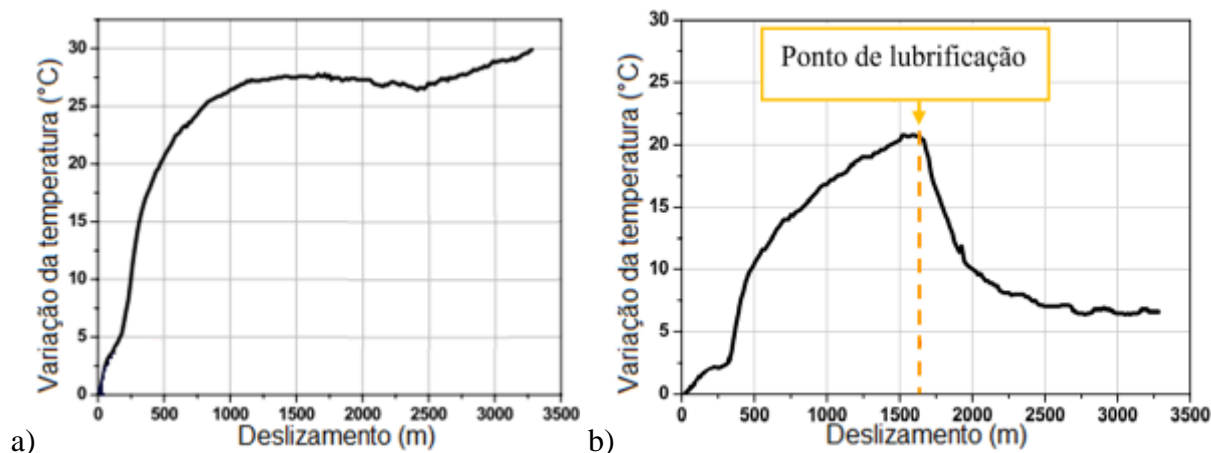
Figura 32.: Coeficiente de atrito e desgaste do Elastômero NBR contra o Aço inoxidável, com e sem envelhecimento a 80°C.



Fonte: Dong, 2015

No trabalho de Santana (2009) foi estudado o comportamento tribológico do polímero NBR em contato com o aço AISI 52100, sob uma velocidade de 0,8 metros por segundos e uma carga aplicada de 3,15N. A Figura 33 mostra a variação de temperatura em relação a quantidade percorrida do teste sob a influencia de uma lubrificação ou sem a influencia da lubrificação.

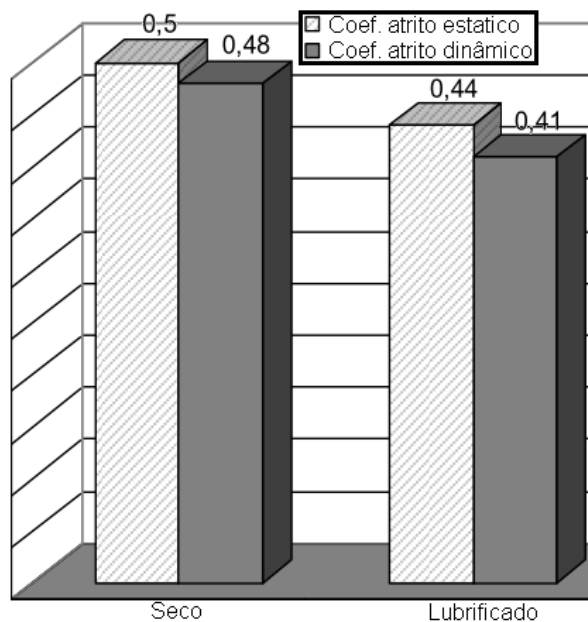
Figura 33.: Deslizamento em relação a variação de temperatura do NBR com AISIN 52100, carga de 3,15N e velocidade de 0,8m/s. a) sem lubrificação e b) com lubrificação.



Fonte: Santana, 2009.

Penev (2013) estudou a propriedade de atrito da borracha NBR utilizada em chão antiderrapante. Na Figura 34 podemos observar que o atrito estático e dinâmico não apresenta um coeficiente relevante, tanto para o atrito a seco quanto para o atrito lubrificado, a diferença entre eles fica de 2 a 3 centésimos. Porém nota-se que o coeficiente de atrito com lubrificação é quase um décimo menor que o a seco.

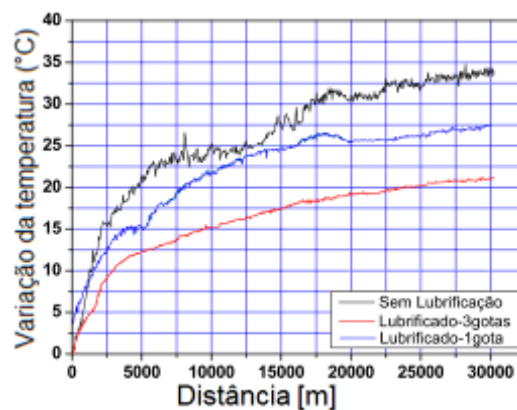
Figura 34.: Coeficiente de atrito estático e dinâmico da borracha NBR com ou sem lubrificação.



Fonte: Penev, 2013.

Oliveira (2007) estudou o desgaste de NBR por esferas de aço SAE 1040 sob uma carga aplicada de 45N, em ensaios a seco e lubrificado com o óleo mineral comercial com viscosidade de SAE 40. A Figura 35 mostra a variação de temperatura durante a distância percorrida, para três tipos de contato das amostras a seco, com lubrificação de uma gota e três gotas. Nota-se uma variação de temperatura maior para a amostra que trabalha a seco, com apenas uma gota de lubrificação a variação de temperatura é menor que a seco, porém maior que a amostra com 3 gotas de lubrificação. Pode-se observar também que nas três amostras tendem a aumentar a variação de temperatura quando aumentamos a distância percorrida.

Figura 35.: Variação de temperatura em relação a distância percorrida da borracha NBR, de três amostras com 1 e 3 gotas de lubrificação e a seco.

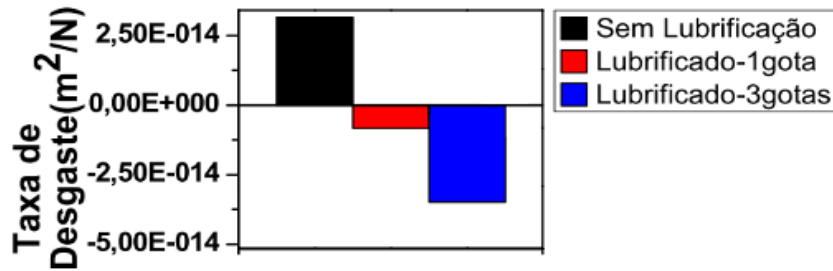


Fonte: Oliveira, 2007.

Outra variação pertinente observada pelo Oliveira (2007) é a taxa de desgaste após a distância percorrida de 5000 metros, para os três diferentes tipos de contato da amostra seco, com 1 e 3 gotas de lubrificação.

Na Figura 36 nota-se que a taxa de desgaste é muito baixa para as amostras lubrificadas sendo que a amostra com 3 gotas representa o menor desgaste, a taxa de desgaste para a amostra sem lubrificação é alta. Os motivos que levam a esse resultado é a maior temperatura da peça sem lubrificação comparada com as demais, conforme mostrado na figura 36.

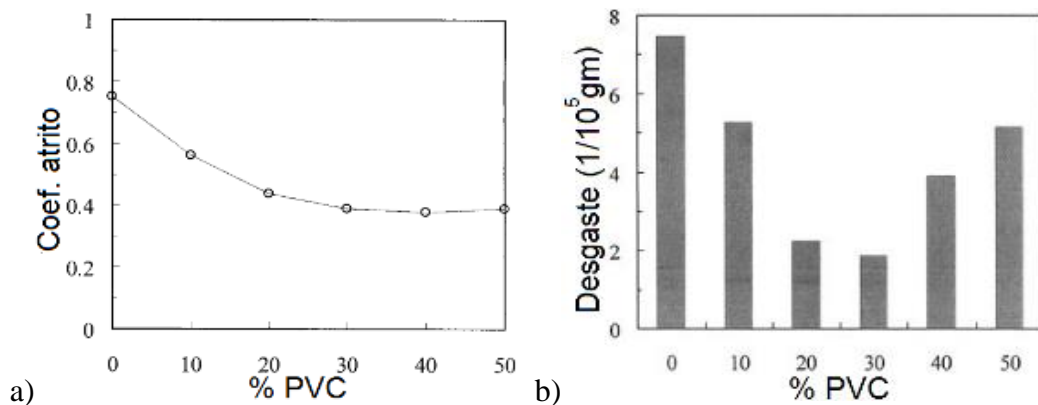
Figura 36.: Variação do desgaste em relação a distância percorrida da borracha NBR.



Fonte: Oliveira, 2007.

O autor Haung (2007) estudou a propriedade de atrito e desgaste do elastômero NBR adicionando até 50% de Policloreto de vinil (PVC) em sua amostra. Na Figura 37 a observa-se que o coeficiente de atrito em um primeiro momento tende a cair com a adição de PVC porém após 30% de PVC nota-se uma estabilização no seu coeficiente de atrito. O autor explica esse fenômeno, comparando o coeficiente de atrito do NBR e do PVC, com 30% de PVC no NBR o coeficiente de atrito fica próximo do coeficiente de atrito do PVC puro. O PVC tem um coeficiente de atrito menor que do elastômero NBR, portanto até 30% PVC o coeficiente de atrito diminui, porém quando passamos de 30% de PVC o atrito estabiliza devido ao seu coeficiente de atrito já estar próximo do coeficiente de atrito do PVC puro. Conforme mostra a figura 37 b o desgaste diminui com a adição de até 30% de PVC, porém após essa porcentagem o desgaste volta a aumentar com a adição de mais PVC. Até 30% de PVC no elastômero temos uma boa mistura, fazendo com que o PVC vire reforço e diminua o desgaste, porém acima de 30% o PVC fica saturado na mistura não tendo total adesão entre os dois materiais o desgaste aumenta.

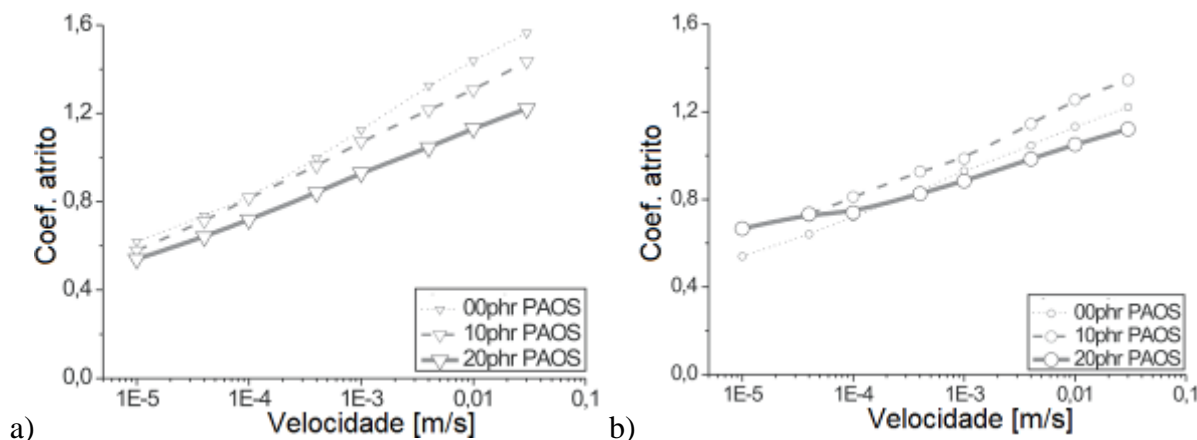
Figura 37.: Comportamento do copolímero NBR com diferente % de PVC, a) Coeficiente de atrito e b) Desgaste.



Fonte: Haung, 2007.

Busse (2011) estudou a redução do atrito com nanopartículas de Al_2O_3/SiO_2 na borracha NBR, com carga de aproximadamente 50N e diferentes velocidades. Na figura 38a podemos observar que a velocidade é diretamente proporcional ao coeficiente de atrito, independente do teor da porcentagem de SiO_2 na amostra, isso ocorre se repete para a figura 38b que mostra o material recozido a temperatura de 60°C. Outro resultado observado na Figura 38a é que coeficiente de atrito tende a diminuir com o aumento de SiO_2 adicionado ao material. Já na Figura 38b podemos notar que a partir da velocidade de 0,0001 metros por segundo temos um coeficiente de atrito é mais elevado para a amostra de 10% de SiO_2 (10phr PAOS) se comparado as demais amostras, ao mesmo tempo o coeficiente de atrito da amostra com 20% de SiO_2 começa com um coeficiente alto porem com o aumento da velocidade tende a ter o menor coeficiente de atrito dentre as amostras analisadas neste gráfico.

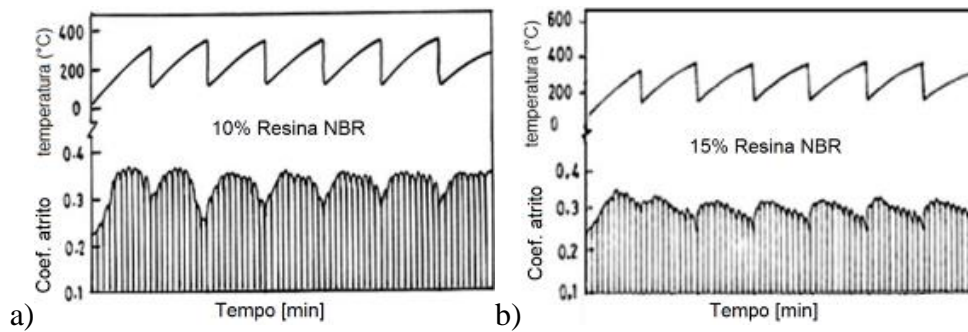
Figura 38.: Variação do coeficiente de atrito e a velocidade da borracha NBR com adição de até 20% de SiO_2 , a) sem recozimento e b) com recozimento.



Fonte: Busse, 2011.

Nidhi (2007) estudou a interferência de diferentes porcentagens de resinafenólicano NBR em relação ao coeficiente de atrito e a temperatura. A temperatura foi gerada durante o atrito em que condições de frenagem sob uma pressão de 1,82MPa e momento de inércia 2,5Kgm². Pode-se notar na Figura 39 que com o aumento da resina a amostra tende a ter um coeficiente de atrito menor, porém sua temperatura não se altera oscilando entre 200 e 400°C.

Figura 39.: Variação do coeficiente de atrito e a velocidade da borracha NBR, a) sem lubrificação e b) com lubrificação.

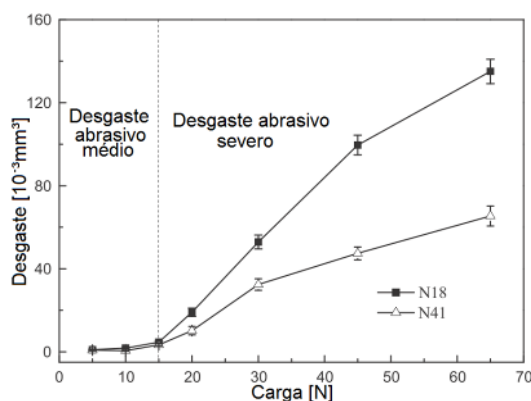


Fonte: Nidhi, 2007.

Wang (2015) estudou a borracha nitrílica com 18% e 41% de acrilonitrila, caracterizando seu desgaste e coeficiente de atrito. As borrachas NBR sofrem ainda variação de propriedades com a exposição à temperatura e à presença de óleos ou meios contendo enxofre, que irão alterar o grau de polimerização.

O gráfico da Figura 40 compara o desgaste em função a carga aplicada para dois materiais com diferentes porcentagens em peso de acrilonitrila, no caso da amostra N18 teremos 18% de acrilonitrila e na amostra N41 teremos 41% de acrilonitrila. O desgaste foi dividido em dois regimes, médio e severo, o severo sendo observado com cargas acima de 15N. Observa-se que para o desgaste severo quanto maior a carga maior será seu desgaste, independente da porcentagem de acrilonitrila analisada. O gráfico da Figura 40, mostra uma porcentagem maior de acrilonitrila o desgaste é inferior no regime de desgaste abrasivo severo e a diferença de desempenho aumenta como o aumento de carga. Porém se olharmos apenas o desgaste abrasivo médio a diferença entre eles é desprezível.

Figura 40.: Gráfico relacionando desgaste com a carga aplicada.



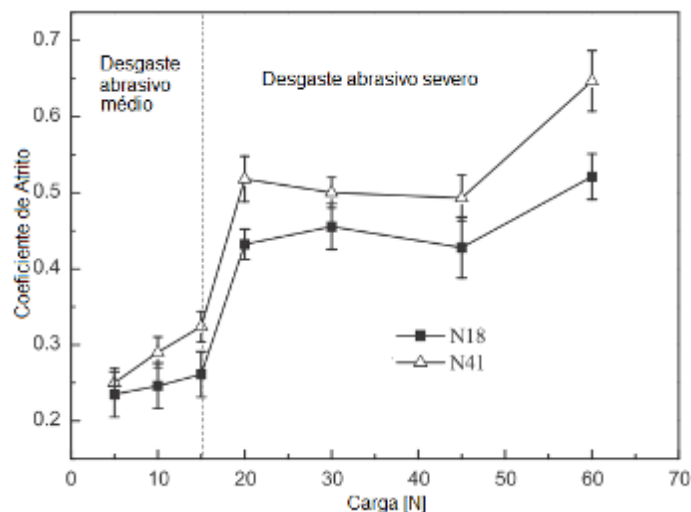
Fonte: Wang, 2015.

O gráfico da Figura 41 compara o desgaste em função a carga aplicada para dois materiais com diferentes porcentagens em peso de acrilonitrila, no caso da amostra N18 teremos 18% de acrilonitrila e na amostra N41 teremos 41% de acrilonitrila.

A Figura 41 do autor Wang (2015) mostra uma interpretação em uma porcentagem maior de acrilonitrila N41, o coeficiente de atrito é superior a amostra N18, tanto para o desgaste abrasivo médio quanto para desgaste abrasivo severo.

Outro fator observado no mesmo gráfico de Wang (2015) nas duas amostras o desgaste abrasivo médio apresentou um coeficiente de atrito aproximadamente na metade do desgaste abrasivo severo. Outro fator que poderia ser relacionado é a relação entre a carga e o aumento do coeficiente de atrito.

Figura 41.: Gráfico relacionando coeficiente de atrito com a carga aplicada.



Fonte: Wang, 2015.

Rocha (2007) estudou os ganhos de propriedades com o aumento de acrilonitrila para o elastômero NBR. Conforme mostra a Figura 42 elastômeros com maior porcentagem de acrilonitrila tendem a ter uma taxa de desgaste menor, pois ele tende a ter uma maior resistência ao envelhecimento e à abrasão.

Figura 42.: Variação do coeficiente de atrito e a velocidade da borracha NBR.

NBR com menor percentagem de acrilonitrila	Propriedades	NBR com maior percentagem de acrilonitrila
	Processabilidade	→
	Taxa de cura com enxofre	→
	Resistência a óleos	→
	Compatibilidade com polímeros polares	→
	Impermeabilidade a gases e ar	→
	Resistência à tração	→
	Resistência à abrasão	→
	Resistência ao envelhecimento	→
←	Taxa de cura com peróxido	
←	Resiliência	
←	Histerese	
←	Flexibilidade a baixas temperaturas	

Fonte: Rocha, 2007.

De modo geral podemos inferir dos trabalhos mostrados, o efeito de algumas variáveis sobre o desgaste e atrito do NBR:

A) Fator cargas e porcentagem de acrilonitrila no elastômero.

A introdução fases de reforço como até 30% de PVC (HAUNG, 2007), SiO₂ (BUSSE, 2011), resina NBR (NIDHI, 2007) no elastômero de NBR tendem a diminuir o coeficiente de atrito. Os autores Wang (2015) e Rocha (2007) mostraram que quanto maior a porcentagem de acrilonitrila menor será o desgaste, mas que este efeito depende da carga aplicada ao sistema.

B) Carga Aplicada:

Nos trabalhos do autor Shen (2016) nota-se uma tendência em aumento do coeficiente de atrito para cargas menores.

No trabalho de Wang (2015) observou-se que uma maior carga aplicada tem tendência a aumentar o desgaste e o coeficiente de atrito.

C) Efeito da Velocidade

No trabalho de Penev (2013) observou que o coeficiente de atrito estático é maior que o coeficiente de atrito dinâmico, apesar de ser baixa essa diferença entre os dois tipos. Shen (2016) mostra que precisa de uma quantidade de ciclos para a estabilização do coeficiente de atrito. Observou também a relação da amplitude interferindo no coeficiente de atrito.

No estudo de Dong (2015) o aumento da velocidade resulta na diminuição do coeficiente de atrito. Porém no trabalho de Busse (2011) verificamos o contrario com o aumento da velocidade tivemos um aumento no coeficiente de atrito.

Em relação ao desgaste Dong (2015) observou que o desgaste é maior quando aumentamos a velocidade.

D) Fator Temperatura

O autor Dong (2015) observou que quanto maior o tempo que o elastômero ficou sob temperatura, maior foi a sua taxa de desgaste e seu coeficiente de atrito. Porém o autor Busse (2011) mostra que após um envelhecimento o coeficiente de atrito tem a tendência a diminuir.

Santana (2009) e Oliveira (2007) observaram que quanto maior a distância percorrida, maior será a temperatura. Notaram também que o aumento de temperatura pode diminuir com a lubrificação no momento do trabalho.

E) Lubrificante:

O trabalho de Santana (2009) mostrou que acrescentando uma lubrificação entre os materiais, a temperatura tende a diminuir. Segundo os trabalhos de Penev (2013); Santana (2009) e Oliveira (2007) podem verificar que quando temos um lubrificante entre os ensaios tribológicos, o coeficiente de atrito tende a cair compararmos ao coeficiente de atrito do ensaio a seco.

Oliveira (2007) observou que o trabalho a seco da borracha nitrílica leva um desgaste muito maior que o trabalho sob lubrificação.

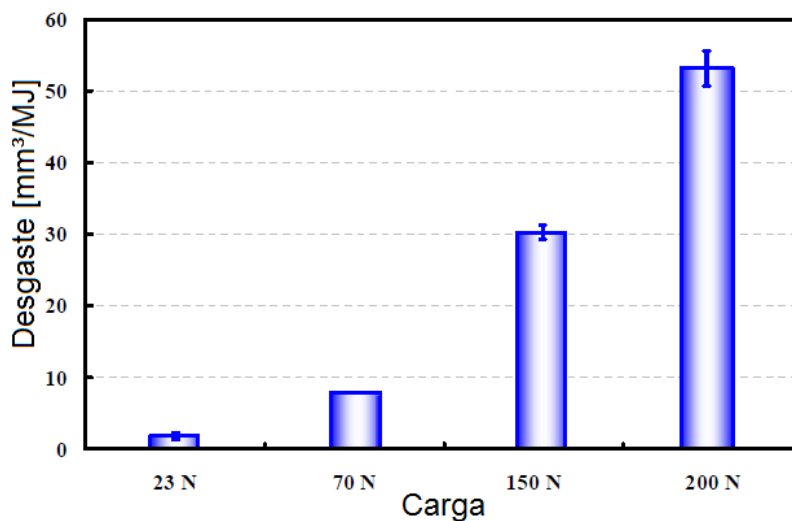
2.4.3. Comportamento da Lona de Embreagem

Atualmente a Lona de embreagem é utilizado para transferir o torque do motor para o câmbio, porém nesta dissertação de mestrado utilizaremos a lona para a função de elemento de atrito dentro do disco de embreagem, com a função de filtrar ruídos gerado pelos motores a combustão.

O estudo de Fernandes (2007) apresenta a lona de embreagem trabalhando contra o ferro fundido, com carga crescente. Nota-se na (Figura 43) que o desgaste é diretamente proporcional à carga.

Figura 43.: Comportamento do desgaste em relação a variações da carga para a lona.

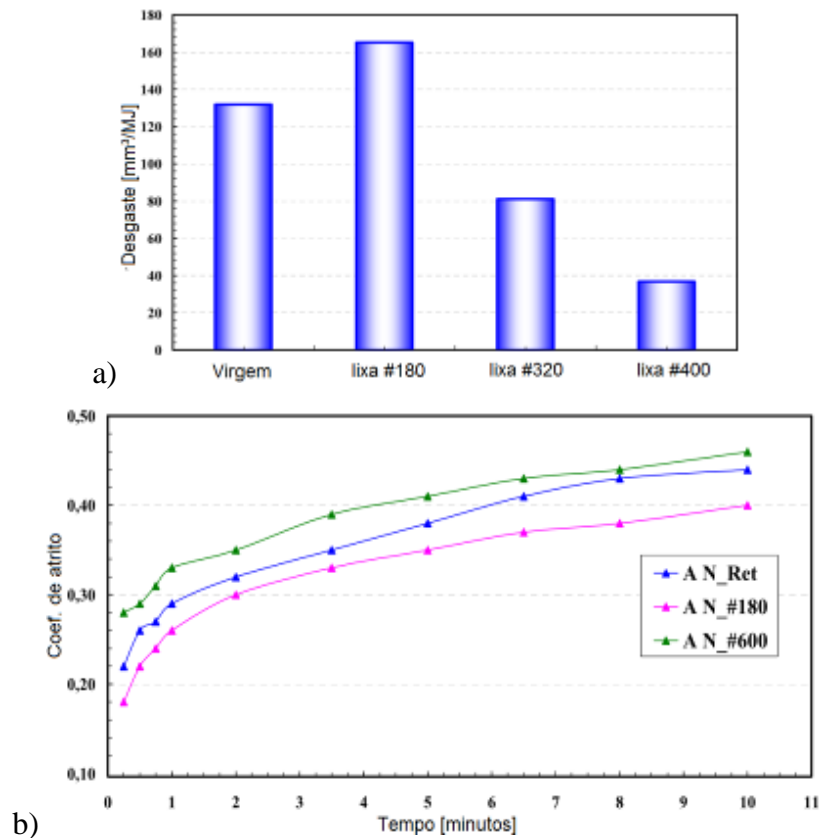
Condições de ensaio: velocidade de deslizamento 750 rpm, tempo de ensaio de 180 minutos.



Fonte: Fernandes, 2007

Ainda no estudo de Fernandes (2007), estudou a lona em diferentes tipos de acabamentos superficiais, comparando o desgaste e o atrito entre os diferentes tipos de superfície com velocidade de 750 rpm e a carga de 200N. Quanto maior a rugosidade da superfície da lona, maior o desgaste (Figura 44a), para todo o tempo de ensaio observou-se que para a superfície com menor rugosidade o coeficiente de atrito é maior (Figura 44b).

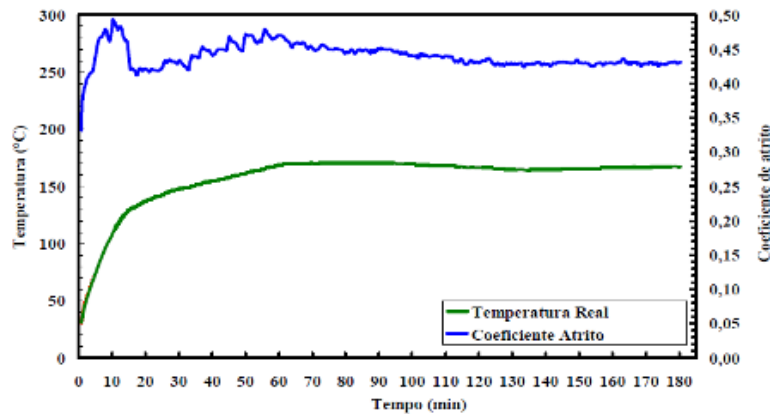
Figura 44.: Comportamento do desgaste e do coeficiente de atrito da lona de embreagem contra o Ferro fundido. Condição topográfica inicial da Lona: a) no desgaste; b) no atrito



Fonte: Fernandes, 2007

Sob carga de 200N e velocidade 750 rpm, Fernandes (2007) observou que a temperatura de trabalho sob condições de atrito seco pode chegar a 150°C, e o coeficiente de atrito apresenta um pico nos primeiros minutos, estabilizando-se entre 0.43 (Figura 45).

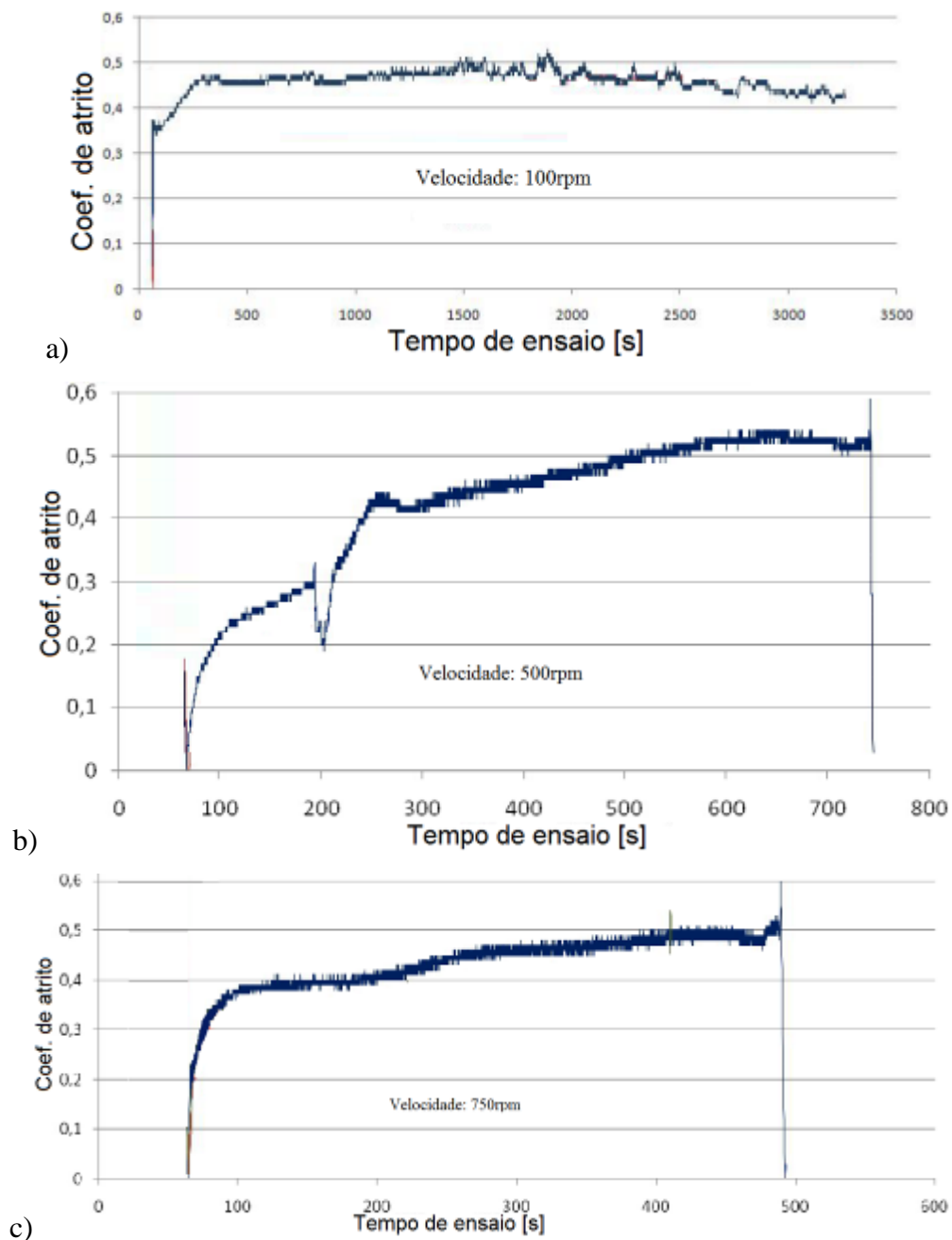
Figura 45.: Comportamento do atrito em relação a temperatura durante um período de tempo.



Fonte: Fernandes, 2007.

Pritzelwitz (2010) também estudou o coeficiente de atrito de lona de embreagem de presas mecânicas em diferentes velocidades e cargas aplicadas. Nas Figuras 46 a, b e c o autor Pritzelwitz (2010) traz a comparação do coeficiente de atrito em relação ao tempo de ensaio em três diferentes velocidades em rotações por minuto (RPM). Observa-se que com uma menor velocidade o coeficiente de atrito é menor comparado as velocidades maiores testadas (Figura 46).

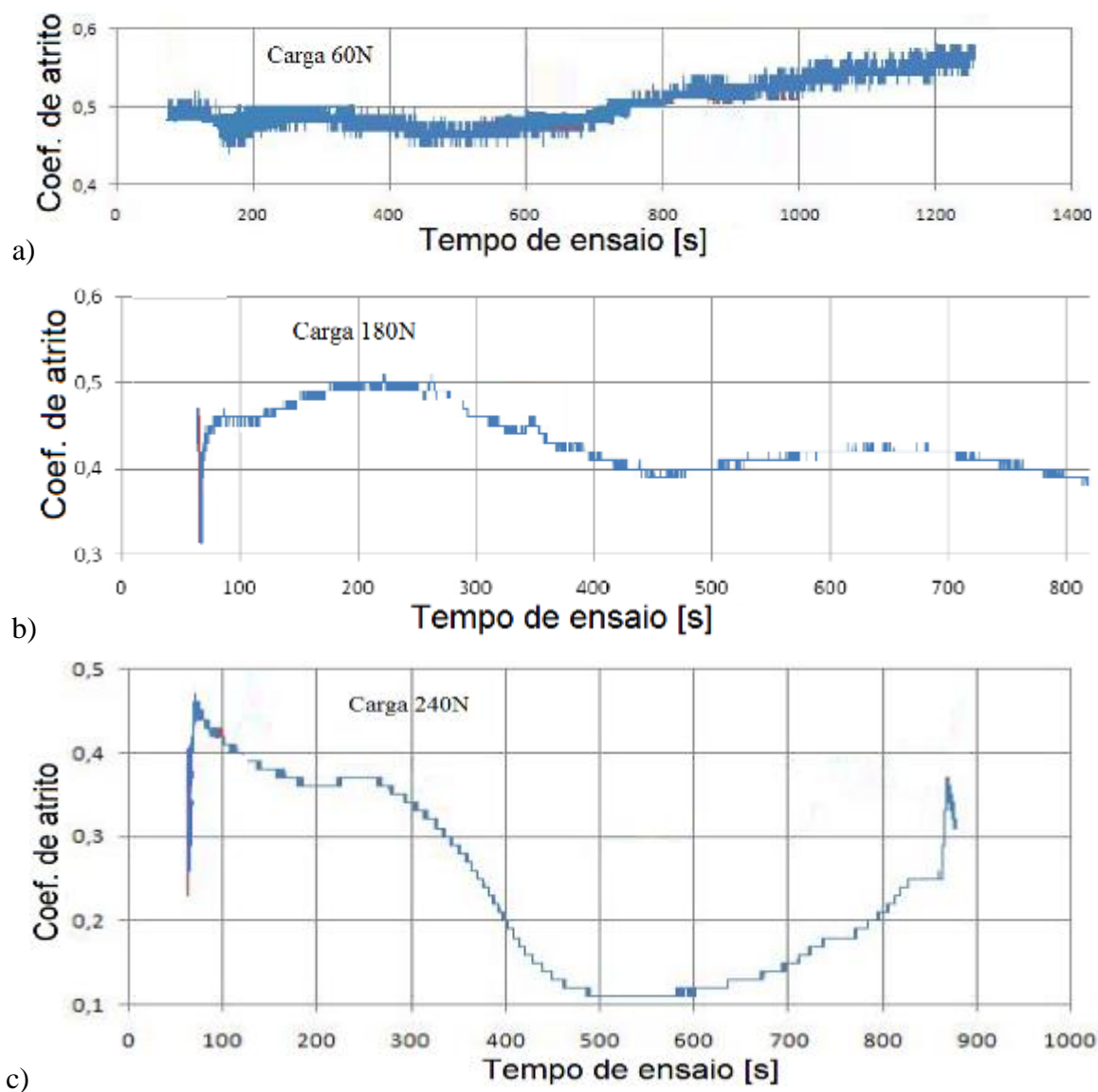
Figura 46.: Coeficiente de atrito da lona com carga de 100N variando o tempo de ensaio e a velocidades: 100rpm, 500rpm e 750rpm.



Fonte: Pritzelwitz, 2010.

Outra observação pertinente de Pritzelwitz (2010) é a comparação o coeficiente de atrito em relação ao tempo de ensaio e a carga aplicada. Observa-se que com uma menor carga a variação do coeficiente de atrito é menor comparado as cargas maiores testadas (Figura 47). O gráfico da Figura 47 c) mostra-se um coeficiente de atrito nos primeiros segundos sem queda, após chegar a um atrito perto de 0,1 há uma tendência de aumento do mesmo.

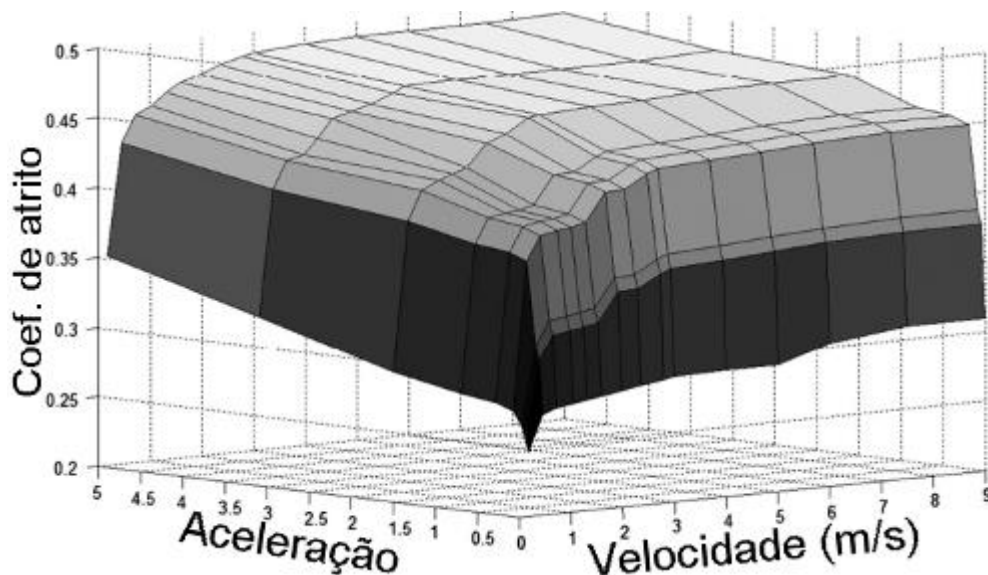
Figura 47.: Coeficiente de atrito da lona variando o tempo de ensaio e a cargas: 60N, 180N e 240N.



Fonte: Pritzelwitz, 2010.

O autor Senatore (2011) estudou o comportamento do material de atrito de freios e embreagens considerando a aceleração. Podemos notar que na Figura 48 o coeficiente de atrito está dependendo diretamente da velocidade e aceleração, podendo observar que esse fator é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior for a aceleração ou a velocidade maior será o coeficiente de atrito.

Figura 48.: Gráfico de aceleração, velocidade e coeficiente de atrito de uma lona



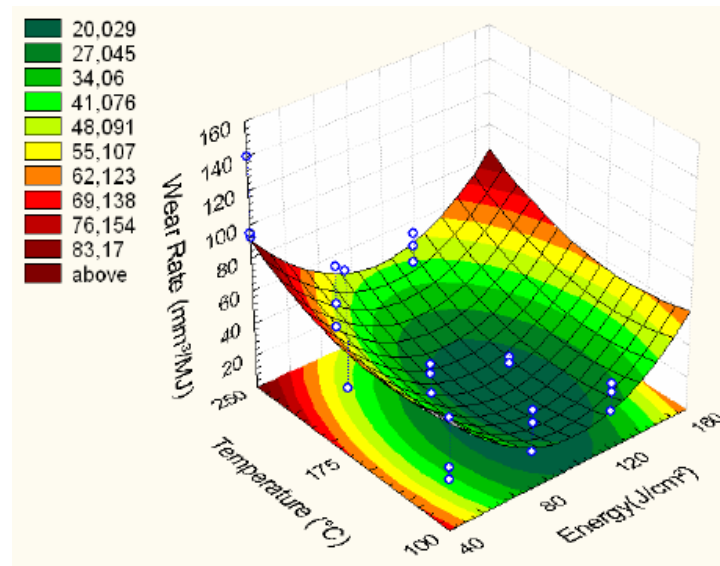
Fonte: Senatore, 2011.

Conforme mostrado por Gregori (2005) a taxa de desgaste é diretamente influenciada por duas grandezas: a temperatura e a energia. A energia é calculada através da multiplicação de três fatores a velocidade angular que é constante, a variação do tempo e do torque. Podemos observar (Figura 49) que o aumento da temperatura aumenta a taxa de desgaste, já no caso da energia a curva apresenta uma região de mínimo desgaste. Quando observa o gráfico na parte e relaciona o desgaste com a energia gerada, podemos notar que não segue uma proporcionalidade onde a maior e menor energia tende a ter uma taxa maior de desgaste.

Esse fenômeno de diferença no desgaste para a variação de energia gerada é explicável pelo fato de uma energia baixa, a matriz e a fibra estão ligadas por fracas gerando o arrancamento das fibras na matriz. Caso aumentarmos à energia, a matriz começa a “amolecer” fazendo com que um micro filme fique entre as faces atritantes, com uma terceira face de atrito o desgaste tende a diminuir. Caso a energia fique alta a pressão sobre as faces

aumenta, expulsando esse micro filme entre as faces, assim voltando a gerar um aumento em seu desgaste (GREGORI, 2005).

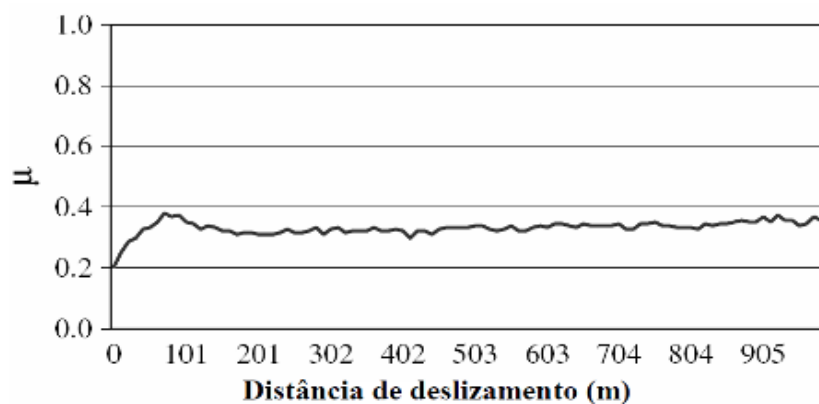
Figura 49.: Comportamento do desgaste da lona no Ferro fundido relacionando a temperatura e a energia do sistema de atrito.



Fonte: Gregori, 2005

Bezzazi (2007) estudou o comportamento do coeficiente de atrito da lona de embreagem em teste de pino disco, com contra corpo de ferro fundido cinzento com dureza de 230HB. O teste foi realizado sobre uma carga de 53N e com velocidade de deslizamento de 1m/s sob uma temperatura 100°C. O comportamento da figura 50 mostra que o coeficiente de atrito da lona tem uma variação nos primeiros 100 metros percorridos, após essa distância o valor do coeficiente de atrito tende a estabilizar durante todo seu ciclo (Figura 50).

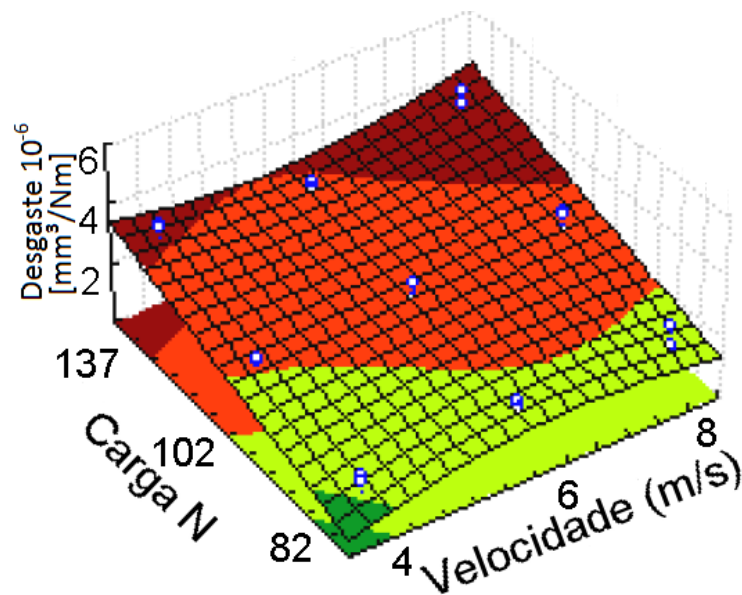
Figura 50.: Comportamento do atrito em relação a temperatura durante um período de tempo.



Fonte: Bezzazi, 2007.

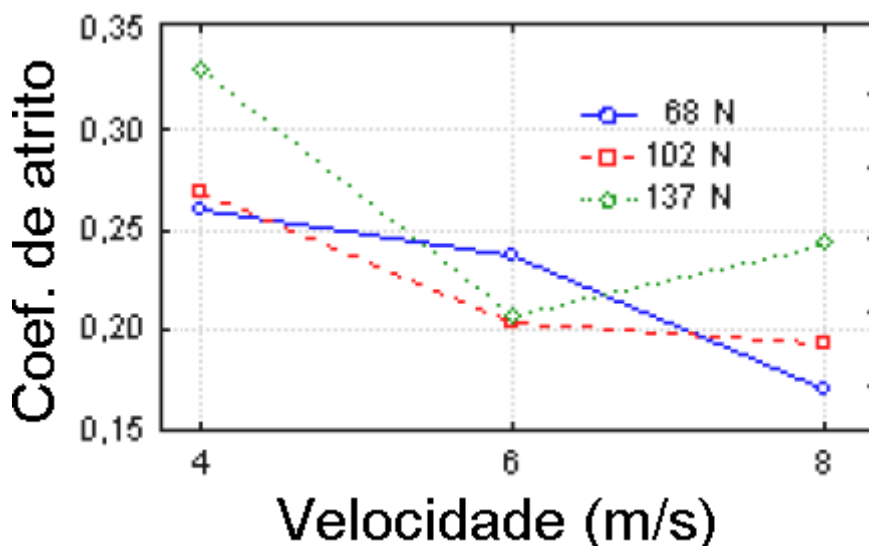
Rodrigues (2007) trás um gráfico em três dimensões para mostrar os difefentes comportamento do coeficiente de atrito, quando alteramos a carga e a velocidade (Figura 51). Observou que a carga é diretamente proporcional a taxa de desgaste, já a velocidade tambem apresenta essa proporção em relação ao desgaste porem de menor efeito. Neste ensaio observou-se que no momento que foi aplicado a carga de 137N com uma velocidade de deslizacao de 8m/s a sua temperatura chegou a atingir 160°C, justificando o maior pico de desgaste.

Figura 51.: Comportamento do desgaste em relação da temperatura e a carga da lona.



Fonte: Rodrigues, 2007.

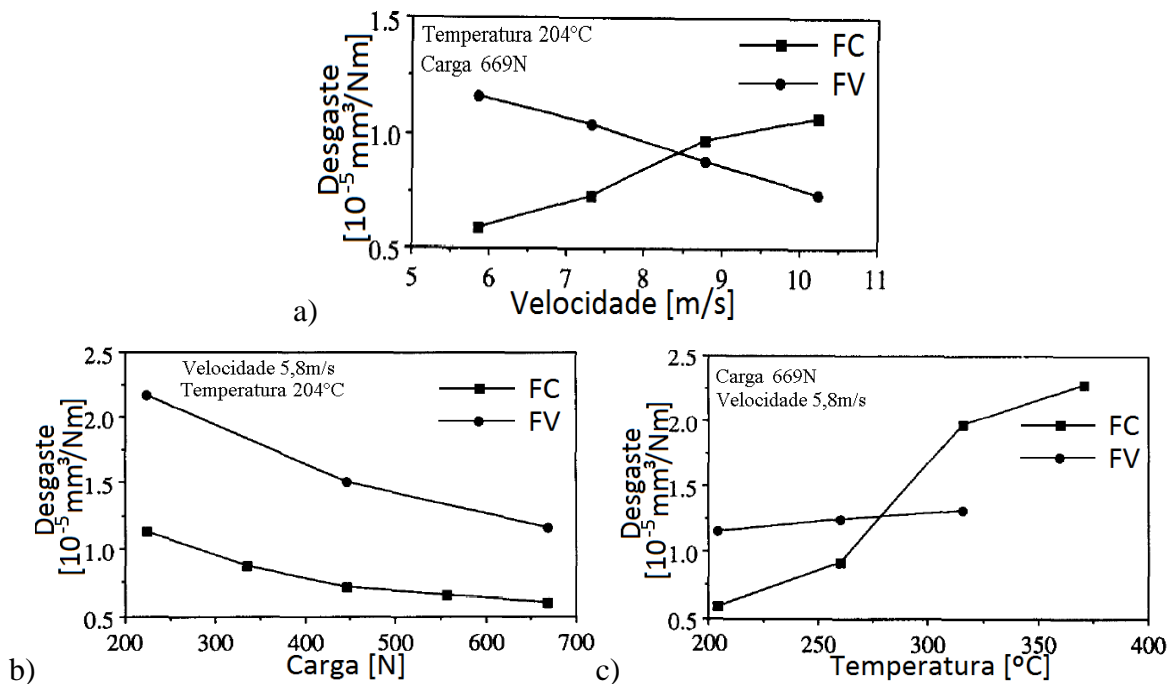
Outro estudo de Rodrigues (2007) foi sobre o coeficiente de atrito em relação a velocidade de três cargas envolvidas. Podemos observar no gráfico da Figura 52, que quanto maior a velocidade menor será o coeficiente de atrito, com exceção a carga de 137N, que na velocidade de 8m/s acaba tendo um acréscimo no seu coeficiente de atrito.

Figura 52.: Comportamento do coeficiente de atrito, velocidade e da carga aplicada na lona.

Fonte: Rodrigues, 2007.

Gopal (1995) fez um estudo completo analisando a carga aplicada, a velocidade de deslizamento e a temperatura para o material de atrito fenólico reforçado com fibra de carbono (FC) ou com fibra vidro (FV) em um contra corpo de aço SAE J661a. A lona que do estudo é constituído por 30% do peso de fibra de carbono ou fibra de vidro, 40% do peso de resina e partículas fenólicas, 20% sulfato de bário e 10% fios de aço. Nota na Figura 53a) que a taxa de desgaste do material reforçado com fibra de vidro é maior para menores velocidades, porém se aumentarmos a velocidade, percebe-se que os valores se invertem e o material com fibra de carbono passa a ser o material com maior desgaste. Na Figura 53b) observamos que a taxa de desgaste do material reforçado tanto com fibra de vidro ou com fibra e carbono tendem a diminuir com a adição de carga no sistema. Ao mesmo tempo nota-se que o reforço de fibra de vidro independentemente da quantidade de carga existente, mantendo um maior coeficiente comparado a fibra de carbono. Observa-se na Figura 53c) que o reforço de fibra de carbono em uma variação de desgaste considerável quando saímos da temperatura de aproximadamente 200°C e vamos para 350°C, ao mesmo tempo o reforço de fibra de vidro quase não percebe-se essa diferença da taxa de desgaste com a variação da temperatura.

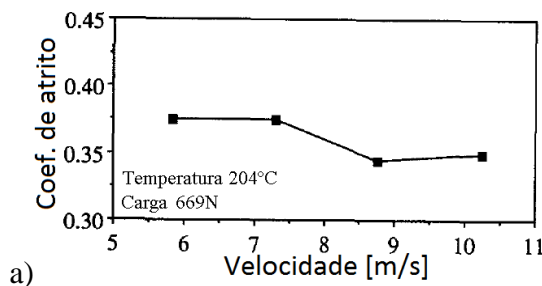
Figura 53.: Variação da taxa de desgaste da lona reforçada com fibra de carbono (FC) ou fibra de vidro (FV), em análise da: a) Velocidade, b) Carga e c) Temperatura.

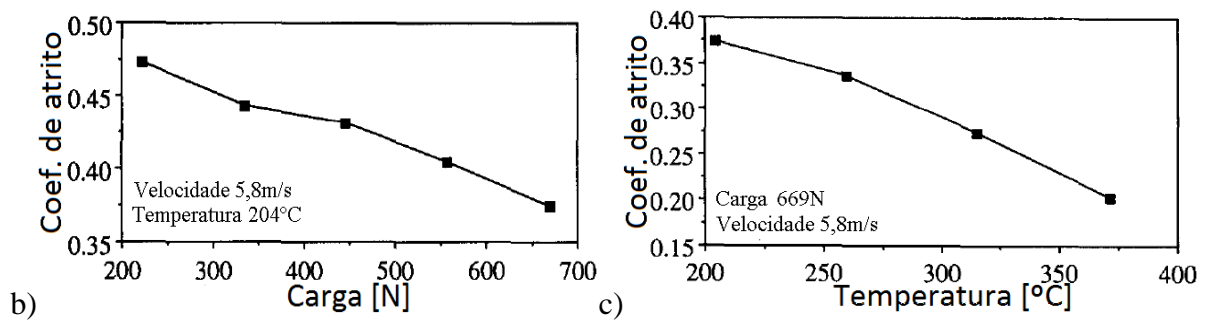


Fonte: Gopal, 1995.

O autor Gopal (1995), estudou também o coeficiente de atrito da lona reforçada com fibra de vidro apenas, em relação à velocidade, carga e temperatura. Nota-se na Figura 54a) b) e c) o coeficiente de atrito tende a diminuir com o aumento de qualquer um dos três fatores analisados: velocidade, carga ou temperatura.

Figura 54.: Variação do coeficiente de atrito da lona com FV, em relação: a) Velocidade, b) Carga e c) Temperatura.

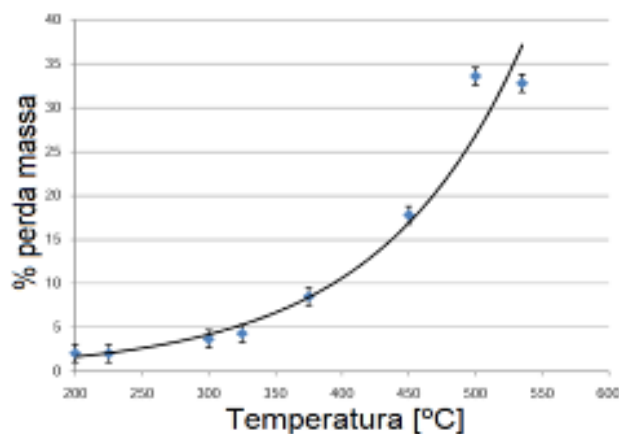




Fonte: Gopal, 1995.

O autor Pritzelwitz (2010), estudou o desgaste de freios e embreagens de presas mecânicas, o autor não especifica diretamente qual a composição da lona estudada. A Figura 55 mostra o envelhecimento térmico da lona, o autor Pritzelwitz (2010) comenta a perda da resina fenólica após 200 a 300°C.

Figura 55.: Comportamento do aumento de temperatura em relação a perda de massa da lona.



Fonte: Pritzelwitz, 2010.

De modo geral podemos inferir dos trabalhos mostrados, o efeito de algumas variáveis sobre o desgaste e atrito das lonas de embreagem:

A) Efeito da composição da lona

O autor Gopal (1995) mostrou que o desgaste da amostra com fibra de vidro tende a diminuir quando aumenta-se a velocidade. No mesmo trabalho nota-se que o desgaste para a amostra com fibra de carbono aumenta quanto aumenta-se a velocidade. A taxa de desgaste tende a aumentar bruscamente quando a amostra de fibra de carbono é submetida sob temperatura

acima de 250°C, no mesmo teste a amostra de fibra de vidro não apresenta variações consideráveis.

B) Efeito da carga aplicada

Nos trabalhos dos autores Rodrigues (2007); Pritzelwitz (2010) e Gopal (1995) observam uma tendência de aumentar o coeficiente de atrito para cargas menores.

Nos trabalhos dos autores Fernandes (2007) e Gopal (1995) observaram uma tendência de um aumento no desgaste para as cargas maiores.

C) Efeito da velocidade

Nos estudos de Rodrigues (2007) e Gopal (1995) observam que o aumento da velocidade resulta na diminuição do coeficiente de atrito. Porém nos trabalhos de Senatore (2011) e Pritzelwitz (2010) verificamos o contrário com o aumento da velocidade tivemos um aumento no coeficiente de atrito. De fato velocidade, carga e aceleração têm influências interativas, em outra variável que é a temperatura do meio.

D) Efeito da temperatura

O aumento da carga e velocidade aumenta a transferência de calor para o compósito polimérico. Os autores Pritzelwitz (2010) e Gopal (1995) mostram que quanto maior a temperatura maior será o desgaste. Gopal (1995) observou que maior a temperatura menor o coeficiente de atrito.

E) Efeito da rugosidade do contra-corpo

Segundo Fernandes (2007) o nível do coeficiente de atrito varia de acordo com a condição topográfica inicial da lona.

2.4.4. Resumo da revisão da literatura dos materiais estudados

A revisão da literatura mostrou que as variáveis importantes para o estudo do desgaste por deslizamento entre materiais poliméricos e superfícies metálicas são:

a) rugosidade superficial do material metálico: a rugosidade do contra atrito influencia diretamente no desgaste e no coeficiente de atrito. Nos casos analisados neste trabalho quanto

maior a rugosidade temos uma tendência de ter um desgaste maior e um coeficiente de atrito menor.

b) carga aplicada: uma maior carga aplicada no sistema de atrito, gera-se um maior desgaste, porém um menor coeficiente de atrito.

c) velocidade relativa: observou-se a influência direta da velocidade de deslizamento em relação ao desgaste e ao coeficiente de atrito. Nos estudos analisados verificou-se o efeito de uma velocidade maior gera um desgaste maior, e na maior parte dos casos o coeficiente de atrito diminui.

Carga aplicada e velocidade relativa interagem na energia total transmitida durante o contato. Como os polímeros em geral apresentam baixa condutividade térmica esta energia se converte em calor aquecendo o material durante o processo. Ocorrem portanto alterações importantes no comportamento em desgaste e no atrito devido à mudança de resistência mecânica. Além disso, o próprio material pode sofrer alterações microestruturais (envelhecimento) neste processo.

Para melhorar as características de desgaste são acrescentadas cargas de reforço que tem como principal efeito de dissipar a temperatura com o fio de cobre, estabilizar o coeficiente de atrito com a fibra de acrílico, aumentar a resistência mecânica e a centrifugação com a fibra de vidro e aramida, diminuir o desgaste do material com a fibra de vidro.

3. Materiais e Métodos

Dois dos três materiais estudados são hoje utilizados no mercado como componente de anel de atrito de disco de embreagem (PA66 + GF e NBR) e o terceiro é atualmente utilizado em lonas de embreagem (compósito com matriz NBR). Os materiais foram adquiridos de fornecedores da empresa Schaeffler.

Os sistemas de desgaste são complexos: variáveis como rugosidade e natureza do contra-corpo, carga aplicada, velocidade relativa, e amplitude do movimento modificam o aporte térmico transferido ao material de sacrifício. A temperatura de trabalho tem grande influência no desgaste e coeficiente de atrito dos materiais deste estudo. Com o objetivo de entender melhor os fenômenos envolvidos o trabalho é dividido em duas etapas.

A primeira etapa consiste na caracterização microestrutural e determinação da estabilidade térmica dos três materiais sem a influência de atrito. Para isso foram realizadas análises em microscopia óptica e eletrônica de Varredura (MEV), Teste de Queima para porcentagem de fibra e tratamentos de envelhecimento, seguido de análises através de calorimetria diferencial, dureza, espectroscopia no infravermelho.

A segunda consiste na determinação das características de desgaste e de atrito do material em função das variáveis de influência em condições controladas de laboratório. Para isso fez-se um teste de bancada com o objetivo de medir estas propriedades em condições extremas de pressão específica e velocidade seguindo a norma DIN50320 (1979).

3.1. Materiais

Os componentes do sistema tribológico estudado são:

Material do contra-corpo: Dispositivo metálico de aço SAE 1045, dureza de 185HB, rugosidade superficial (Ra) de aproximadamente 2 μ m. (Figura 56)

Figura 56.: Foto do contra corpo metálico do Anel de atrito.



Fonte: Elaboração Própria.

Deslizando em atrito seco contra **Anéis de atrito** com área de 768,9mm², de face plana, compostos de:

- Compósito PA66GF35 é formado pela matriz de Poliamida 6,6 (PA66), reforçada com 35% de fibra de vidro (GF35), adquirido da empresa de matéria prima FEPASA. A Figura 57 mostra foto do anel e na Tabela 4 suas propriedades encontradas.

Figura 57.: Foto do Anel de atrito PA66GF35.



Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 4.: Propriedades controladas das amostras PA66GF35.

Propriedades	Norma	Unidade	Especificação	Controlado
Peso Específico	ASTM D792	-	1,41 + 0,02	1,41
Teor de Reforço/Carga	IT 8.2.4.4	%	35 + 3,0	34,3
Resistência à Tração	ASTM D638	MPa	≥ 160,0	173,7
Alongamento à Tração na Ruptura	ASTM D638	%	≥ 2,0	3,2
Resistência à Flexão	ASTM D790	MPa	≥ 250,0	268,2
Resistência ao Impacto Izod, com entalhe	ASTM D256	J/M	≥ 95,0	109,3
Flamabilidade	UL94	-	HB	HB
Coefficiente de atrito	0_84C_030_1D	-	0,5 ± 0,1	0,15

Fonte: Elaboração Própria.

- Elastômero NBR conhecido comercialmente por Alpha 66, adquirida comercialmente da empresa alemã FA. Gumisol. A Figura 58 mostra foto do anel e na Tabela 5 suas propriedades encontradas.

Figura 58.: Foto do Anel de atrito Elastômero NBR.



Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 5.: Propriedades controladas das amostras do NBR.

Propriedades	Norma	Unidade	Especificação	Controlado
Peso Específico	ASTM D792	g/cm ³	1,32 + 0,15	1,30
Dureza Shor A	DIN 53504	-	≥ 90,0	82
Coefficiente de atrito	0_84C_030_1D	-	0,5 ± 0,1	0,45

Fonte: Elaboração Própria.

- A Lona de embreagem conhecido também como compósito de Borracha nitrílica (NBR), reforçada com fibra de Vidro, aramida, acrílica e fio de cobre, adquiriu comercialmente na forma de Schaeffler B-8080 (Lona do disco de embreagem) com diâmetro de 400 mm. A Figura 59 mostra foto do anel e na Tabela 6 suas propriedades encontradas.

Figura 59.: Foto do Anel de atrito da Lona de embreagem.



Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 6.: Propriedades controladas das amostras da Lona de embreagem.

Propriedades	Norma	Unidade	Especificação	Controlado
Peso Específico	ASTM D792	g/cm ³	1,64 ± 0,1	1,63
Teor de Reforço/Carga	IT 8.2.4.4	%	50 ± 5,0	51
Dureza HRS	DIN 53504	-	95 ± 15	98
Coefficiente de atrito	0_84C_030_1D	-	0,45 ± 0,05	0,44

Fonte: Elaboração Própria.

3.2. Caracterização dos Materiais de Estudo

3.2.1. Ensaio de Envelhecimento térmico

O ensaio de envelhecimento térmico foi realizado em caixa seca utilizando um forno tipo mufla Brasimet modelo B-EFU 60/60 pertencente a Schaeffler Brasil Ltda (Figura 60). As amostras foram envelhecidas em duas faixas de trabalho do anel de atrito: 80 e 150°C (desvio padrão de 15°celsius) e tempo de tratamento igual ao adotado nos testes tribológicos: intervalos de 17 horas até um tempo total de 85horas.

Figura 60.: Visão geral do Forno mufla do ensaio de envelhecimento térmico.



Fonte: Elaboração Própria.

3.2.2. Ensaio de Queima

Foi realizado o teste de queima para avaliar a porcentagem em massa de fibra inorgânica que existe no material, o teste foi feito na empresa Schaeffler. O intuito foi medir a massa antes e após testes, o tempo de queima foi de 30 minutos. A variação de massa foi medida em balança digital da marca Shimadzu modelo Auy220 com precisão de 0,0001 gramas.

Figura 61.: Visão geral do bico de bunsen e cadinho.



Fonte: Elaboração Própria.

3.2.3. Microscopia Óptica e de Varredura

As amostras para microscopia foram embutidas em baquelite, lixadas e polidas até granulometria de abrasivo de 1600. A caracterização do tamanho e distribuição das fibras de reforço foi realizada no microscópio óptico marca Olympus pertencente a Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba (UFSCar – Sorocaba) conforme mostra a foto da Figura 62 a.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em microscópio de bancada marca Hitachi modelo TM3000 operando com 15 kV com imagem formada por elétrons retroespalhados conforme mostra a Figura 62 b. A identificação das fibras e cargas de reforço foi realizada, com sonda de análise de dispersão de energia Brucker. Foram analisadas superfícies de fratura e após os ensaios de desgaste e atrito.

Figura 62.: Foto dos Microscópios a) Óptico e b) de Eletrônico de Varredura.



Fonte: UFSCar – Sorocaba.

3.2.4. Análise por calorimetria diferencial exploratória DSC

Para caracterizar as temperaturas de transição dos materiais deste estudo mostrado na Figura 63, utilizamos o equipamento da marca Netzsch modelo DSC 204 F1 pertencente à empresa Schaeffler.

Nesta análise aqueceu-se partindo da temperatura até 400°C, em uma taxa de aquecimento de 10 Kelvin por minuto, utilizou-se um cadinho de alumínio de massa 2mg.

Figura 63.: Foto do Espectrômetro DSC da Schaeffler.



Fonte: Schaeffler Brasil Ltda.

3.2.5. Técnicas de Espectroscopia nas faixas de luz visível e de infravermelho

Para caracterizar o material no estado inicial e após os ensaios de envelhecimento térmico, utilizamos. O equipamento da marca Bruker modelo Tensor 27, pertencente a empresa Schaeffler, em modo de transmitância e refletância com varreduras um comprimento de onda de 400/cm a 4000/cm, com 32 varreduras por controle (Figura 64).

Utilizou pó de KBR seco em uma estufa, para diluir as amostras na proporção de 0,01 gramas de amostra para 0,99gramas de KBR, na pesagem foi utilizada uma balança de precisão da marca Shimadzu modelo AUY220, a amostra com o KBR foi macerada e transformada em pastilhas para realização dos testes.

Figura 64.: Foto do Espectrômetro FTIR da Schaeffler.



Fonte: Schaeffler Brasil Ltda

3.2.6. Técnica de ensaio de Dureza Shore D

Para caracterizar o material nos ensaios de envelhecimento térmico e tribológico, utilizou-se o durometro Shore D da marca Zwick pertencente a Empresa Schaeffler Brasil Ltda.(Figura 65).Utilizou-se a carga de 50N com um tempo de 15 segundos.

Figura 65.: Foto do Durometro Shore D.



Fonte: Schaeffler Brasil Ltda

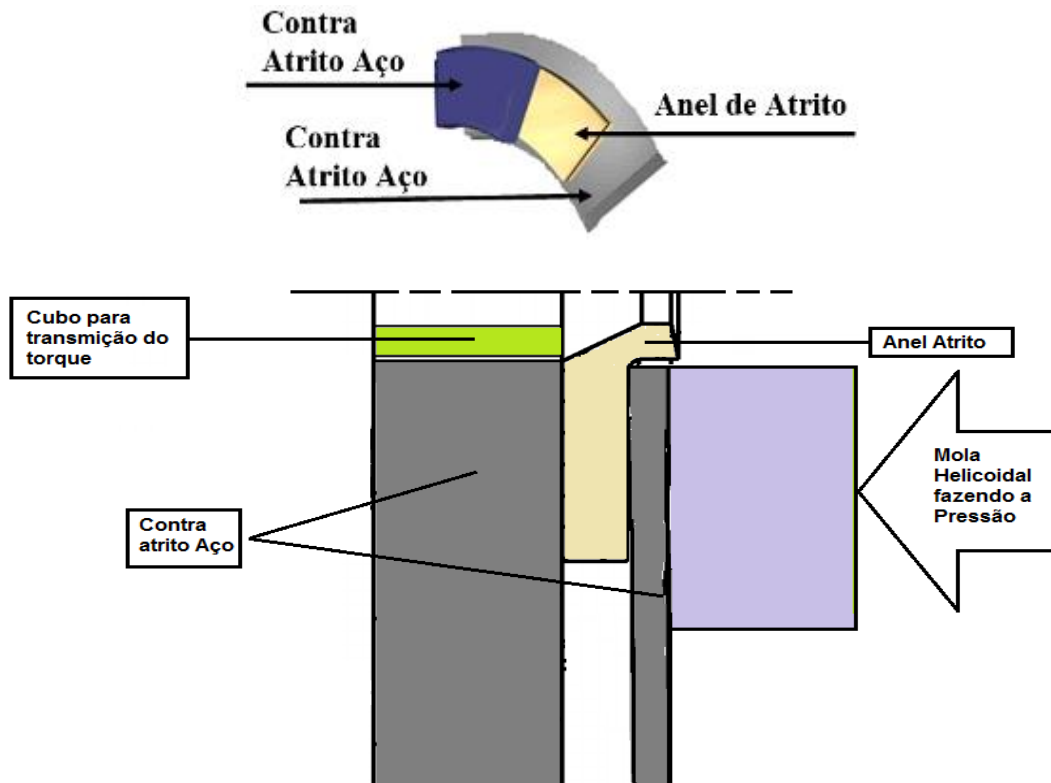
3.3. Ensaio de Atrito e desgaste

3.3.1. Dispositivo para o ensaio de Atrito e Desgaste.

Para os dois ensaios de atrito e o desgaste utilizou-se o mesmo dispositivo de atrito, mostrado na Figura 66. O dispositivo é constituído basicamente por duas faces planas, de aço, entre essas faces planas, é ajustado o anel de atrito. A pressão específica deste sistema é gerada pela mola helicoidal. A transmissão do movimento entre as faces de atrito é feita pelo cubo do sistema atrito, cubo para transmissão do torque, que está acoplado aos eixos da máquina de ensaio. A placa comprime o anel de atrito contra a outra face do dispositivo, fazendo com que o anel de atrito tenha uma pressão específica de 900N/m^2 .

O dispositivo pode ser acoplado tanto à máquina de ensaio de desgaste, quanto à máquina de controle de atrito, (Figuras 67 á 70), os testes e parâmetros são descritas abaixo.

Figura 66.: Esquema do sistema de atrito utilizado no ensaio de atrito e desgaste.



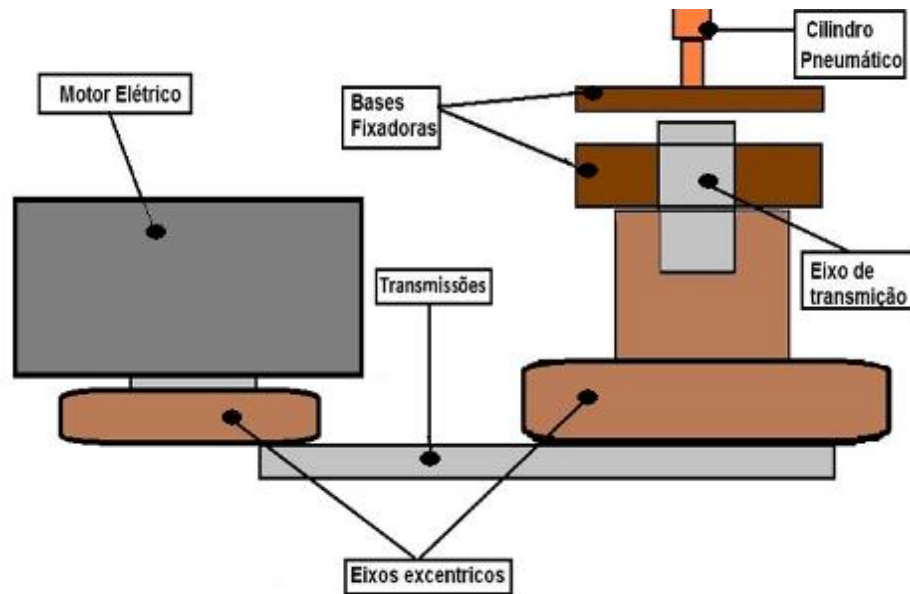
Fonte: Elaboração Própria

3.3.2. Parâmetros e Máquinas de Ensaio de Atrito e desgaste

O teste para determinar a resistência ao desgaste foi realizado em uma máquina de vibrar, construída basicamente por duas bases fixas, um motor elétrico e um sistema de transmissão excêntrico por um eixo estriado, o movimento de rotação relativa simula o sistema do amortecedor torcional do disco de embreagem. A Figura 67 ilustra o funcionamento da máquina de ensaio conforme explicado acima. São medidos e armazenados as seguintes grandezas:

- Transmissão de torque;
- Percorrer distância ou ciclagem delimitada;
- Manter uma velocidade programada.

Figura 67.: Esquema da máquina de ensaio de atrito e desgaste.



Fonte: Elaboração Própria

Foram selecionados os parâmetros do ensaio que consistem no caso mais crítico que poderemos ter em uma embreagem com motores três cilindros. A Figura 68 mostra uma foto da bancada de ensaio de desgaste. Neste teste a pressão específica a pressão específica no valor de 900N/m^2 , a velocidade de deslizamento $23,4\text{m/min}$. A perda de volume foi medida em porcentagem após 1.000.000 e 5.000.000 ciclos, correspondente a uma distância de deslizamento total de 117 quilômetros.

Figura 68.: Visão geral da máquina de ensaio de desgaste.



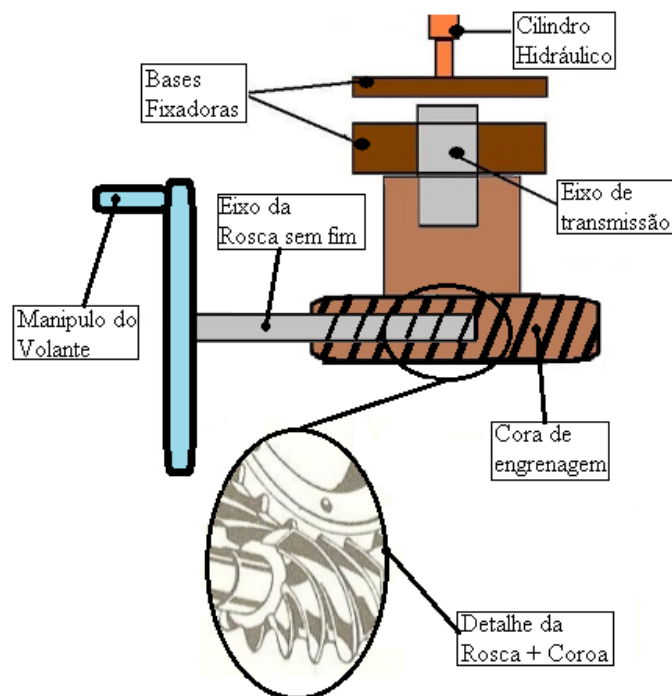
Fonte: Elaboração Própria.

3.3.3. Controle do Atrito

Para acompanhar a função do anel de atrito que é estabilizar o coeficiente de atrito, foi realizado um controle do atrito antes, durante e após o ensaio de desgaste, interrompendo o teste a cada 1.000.000 ciclos e montando o dispositivo de desgaste na máquina de histerese.

O equipamento é construído basicamente por duas bases que fixam a peça por um sistema hidráulico, um sistema de transmissão que conta com o movimento manual do volante, acionando um eixo de rosca sem fim, que transmite para uma coroa de engrenagem e está ligado diretamente no eixo estriado, assim transmitindo o torque (Figura 69).

Figura 69.: Esquema da máquina do controle de histerese.



Fonte: Elaboração Própria

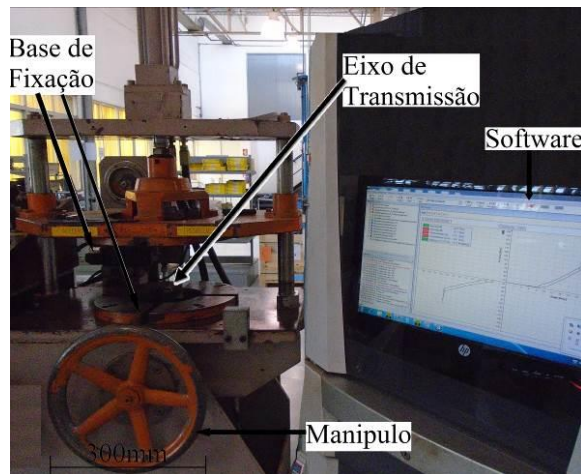
A base do eixo estriado possui uma célula de carga e um sensor de ângulo, os dados adquiridos, são enviados para o software, plotando um gráfico com ângulo, torque e histerese.

Essa máquina de controle de histerese é capaz de medir ou armazenar as seguintes grandezas:

- Transmissão de torque.
- Transmissão de ângulo
- Controle da histerese
- Os pontos de avaliação de atrito foram escolhidos de forma a varrer todo o espectro de solicitações ao qual um conjunto de atrito pode ser submetido em serviço.

- Foi mantida a mesma pressão de 900N/m^2 que o teste de desgaste, e a velocidade angular de controle realizado manualmente através do manipulador da máquina. A Figura 70 mostra a máquina de controle de histerese e coeficiente de atrito.

Figura 70.: Visão geral da máquina de controle de histerese.



Fonte: Elaboração Própria

O valor do coeficiente de atrito de cada material testado é dado pela Equação 06-

$$\mu = \frac{Hy}{(2 \cdot n \cdot \mu \cdot Fn \cdot r_m)} \quad \text{equação 06}$$

Onde:

- μ é o coeficiente de atrito do material de atrito.
- Hy é a histerese do sistema.
- Fn é a força normal, com a qual a face do Aço SAE1045, comprime o anel de atrito contra a base do dispositivo.
- n é o número de faces de atrito do conjunto.
- r_m é o raio médio do anel de atrito, justamente onde atua a Força de Placa.

As flutuações do coeficiente de atrito estão associadas a fatores como desgaste, quebra de óxidos, à variação da carga, velocidade e a fenômenos associados com a remoção de detritos de desgaste, assim como das vibrações transmitidas das partes dos componentes móveis do equipamento ou do ambiente, etc.

No trabalho de Blau (2005), podemos observar que os primeiros períodos de contato por deslizamento entre duas superfícies sólidas que ainda não foram desgastadas, em função da acomodação entre as faces, o coeficiente de atrito pode apresentar um comportamento instável. A literatura traz essa instabilidade como denominada de running in, também conhecido como regime transiente ou de amaciamento.

A variação da média do coeficiente de atrito após um determinado tempo de ensaio, passa a ser constante, tendo o mesmo comportamento para as diferentes cargas de ensaio, ou seja, podemos prever uma convergência das tendências dos valores medidos, e assumir que são os instantes onde as superfícies em contatos adquirem maior conformidade entre elas.

Segundo o autor Pantaleon (2001), a variação passa a ser constante ou nula depois de 3.000 s, se deduz que um processo estável do coeficiente de atrito prevalece e podemos assumir que um mecanismo de desgaste é privilegiado. Determinamos para esse teste de coeficiente de atrito uma estabilização de 20 minutos que teremos por volta de 20.000 ciclos, antes dos primeiros controles, tendo em vista uma maior veracidade dos resultados encontrados em testes.

3.3.4. Controle do Desgaste

A determinação do desgaste sofrido pelos materiais em estudo foi feito de forma comparativa, entre o volume do material de atrito antes do teste e o volume do material após o teste, sendo essa diferença transformaremos em porcentagem para melhor visualização.

O método adotado para calcular o volume de desgaste foi feito por porcentagem de desgaste do material dada pela Equação 07.

$$\Delta desgate_{\%} = \frac{(volume_{final} - volume_{inicial}) \times 100}{volume_{inicial}} \quad \text{equação 07}$$

Onde:

- $\Delta desgate_{\%}$ é a porcentagem de desgaste do material de atrito.
- $volume_{inicial}$ é o volume antes do ensaio de desgaste.
- $volume_{final}$ é o volume após o ensaio de desgaste.

- 100 é a constante para transformação da diferença de espessura em porcentagem.

A temperatura foi coletada durante todo o teste e a cada intervalo de 250.000 ciclos, utilizando um termopar, a uma distância de 3mm do anel de atrito. O cálculo dos parâmetros da distribuição destes dados foi realizado através do método da máxima verossimilhança (MLE) e a escolha da distribuição foi feita através do critério de Anderson-Darling (AD) (LEWIS, 1996).

4. Resultados e Discussões

Nesta dissertação é apresentado a caracterização microestrutural dos materiais, a sua estabilidade térmica e os ensaios de atrito e desgaste.

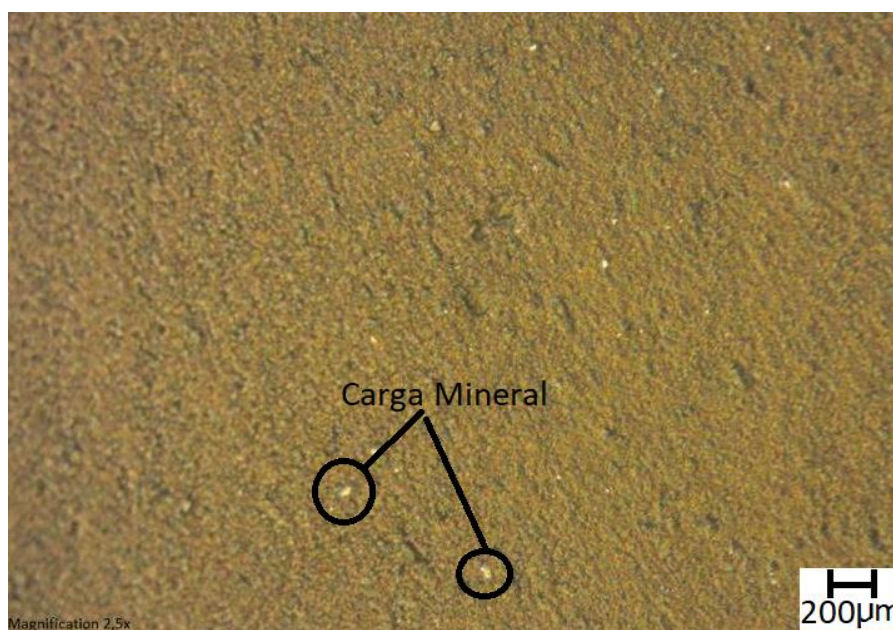
4.1. Caracterização dos materiais

4.1.1. Microscopia Óptica.

Por microscopia óptica foram caracterizados os componentes microestruturais de cada material. Nota-se nessas superfícies uma microestrutura muito diferente entre as amostras: ausência de cargas de reforço (elastômero NBR); elementos provenientes das diferentes cargas da formulação base distribuídos de maneira aleatória (PA6635GF) ou heterogênea (lona de embreagem).

O elastômero NBR mostra-se homogeneidade, com carga mineral distribuída na matriz conforme Figura 71.

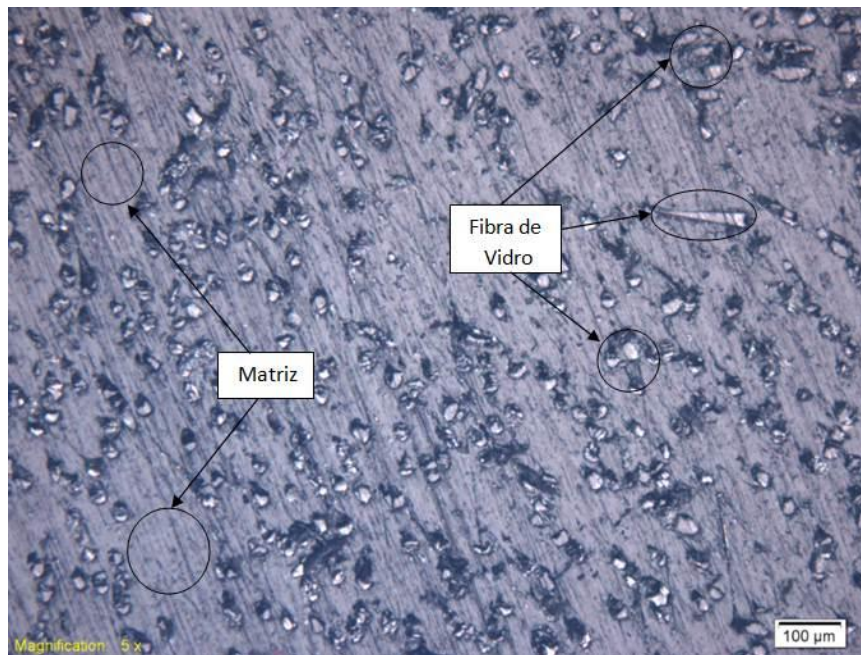
Figura 71.: Microscopia óptica ampliada em 50x do NBR.



Fonte: Elaboração Própria.

No PA66 GF35 observa-se que as fibras de vidros na matriz encontra-se em uma único sentido, transversal ao corte e polimento da amostras, conforme Figura 72. Nota-se também a distribuição homogênea das fibras.

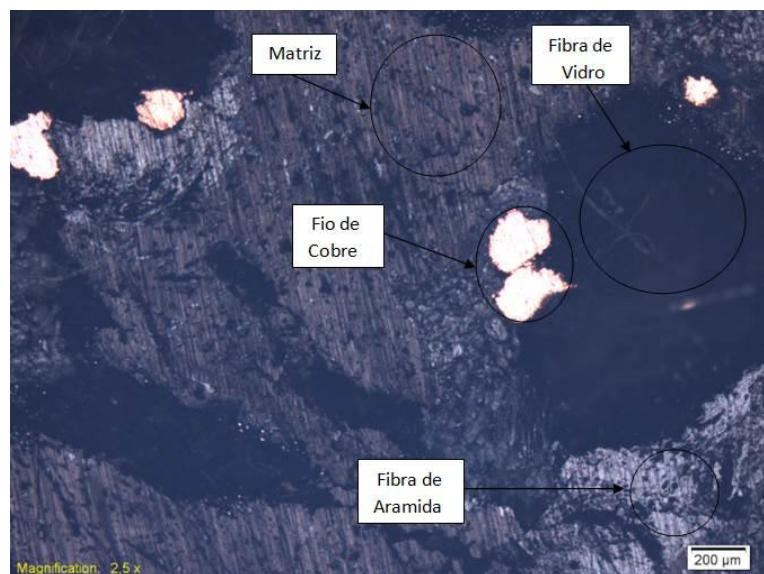
Figura 72.: Microscopia óptica ampliada em 100x da PA66GF35.



Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 73 evidencia as várias fibras na matriz polimérica da lona, a parte mais escura mostra a fibra de vidro, ao, nota-se também que a matriz polimérica apresenta carga mineral de vidro. Observou que as fibras, introduzidas na forma de trama ficam concentradas na parte central do anel, sendo separadas pela matriz oriunda do processo de impregnação.

Figura 73.: Microscopia óptica ampliada em 50x da Lona de embreagem.

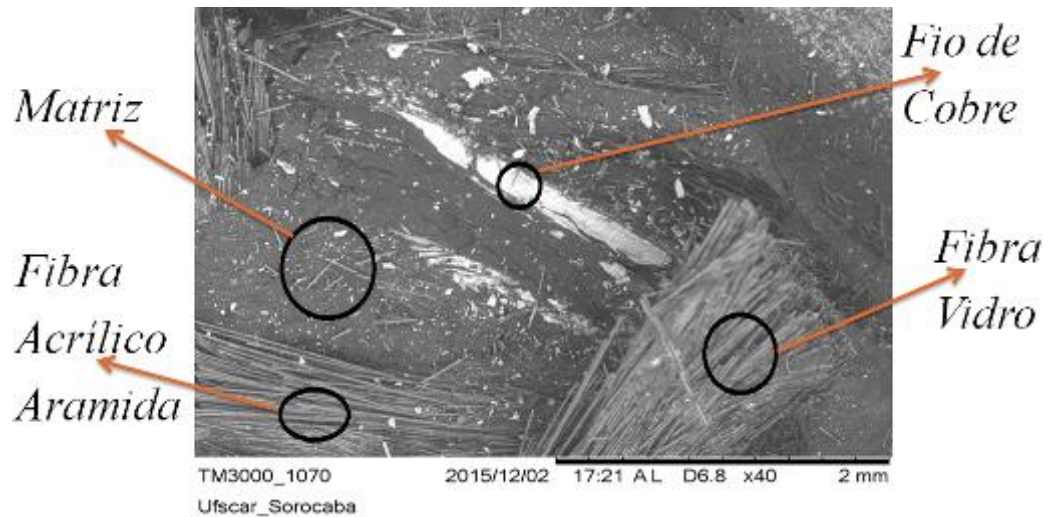


Fonte: Elaboração Própria.

4.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

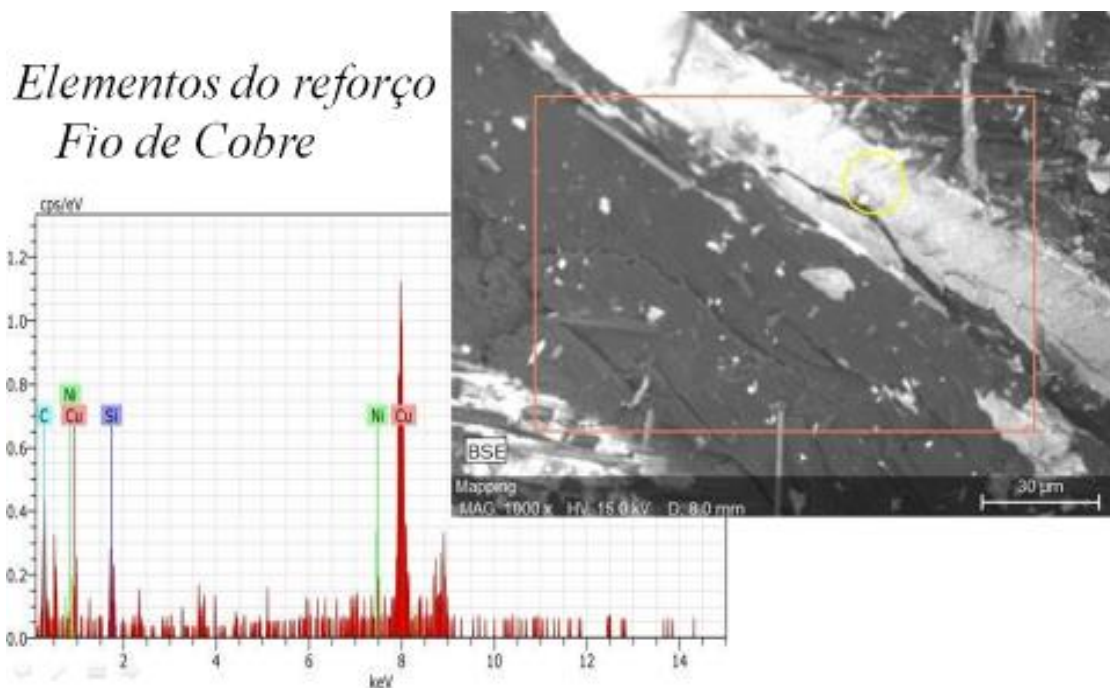
As análises do MEV e EDS foram realizadas em uma superfície de fratura da Lona, por ser o único compósito com grande variação microestrutural, ver Figura 74. O reforço é composto por fios de cobre, fibras de vidro em forma de fio e fibras de aramida, que podem ser vistas nos detalhes das Figuras 75 a 79.

Figura 74.: MEV com visão total da lona.



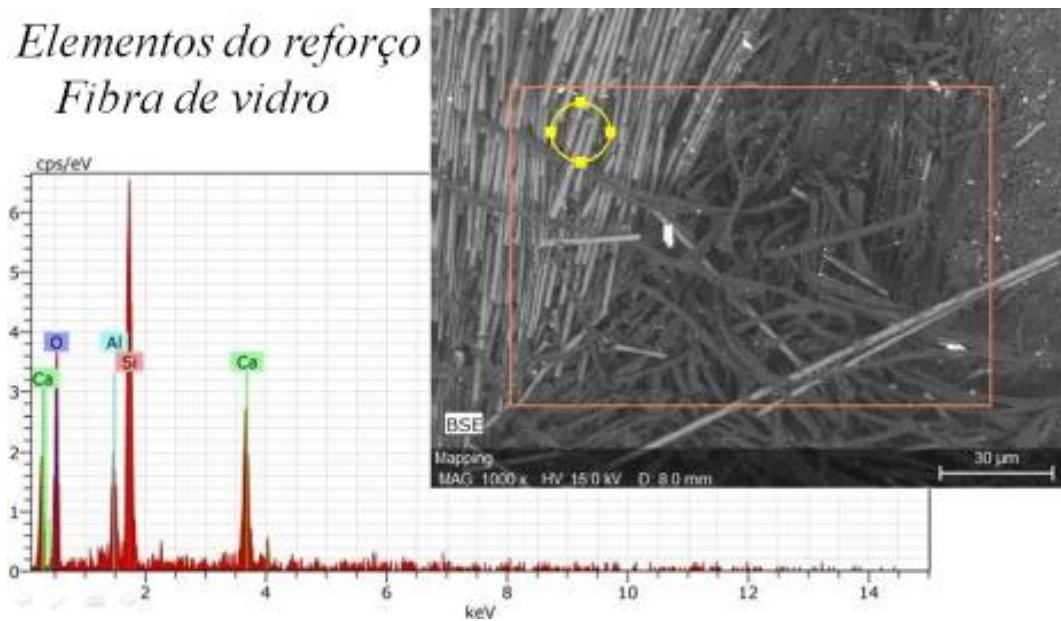
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 75.: MEV e EDS evidenciando o cobre da lona.



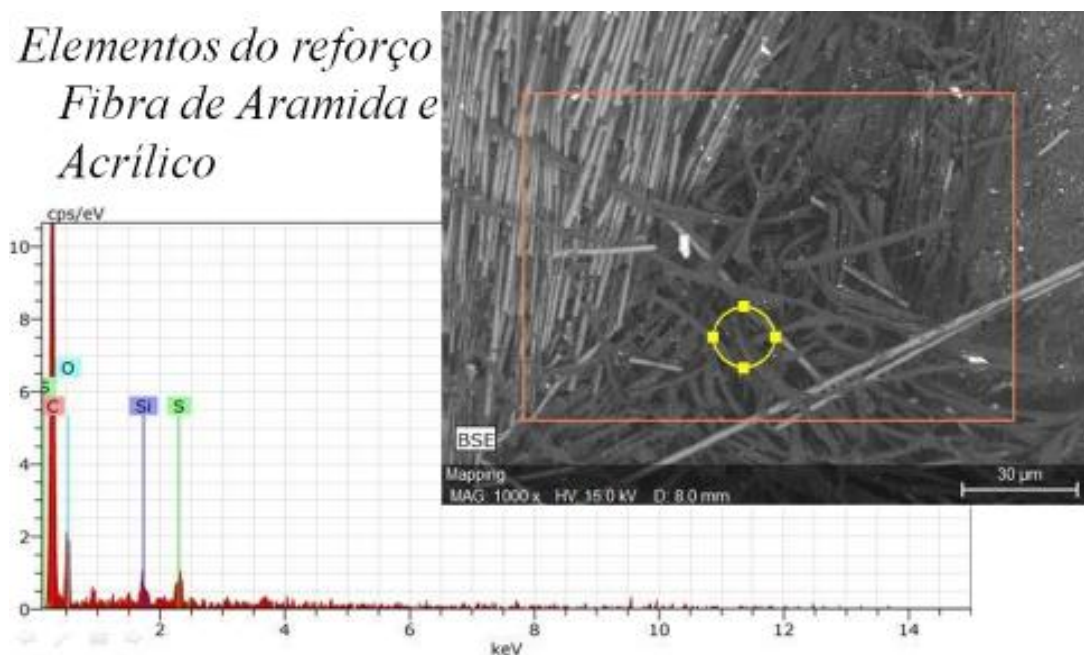
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 76.: MEV e EDS evidenciando a fibra de vidro da lona.



Fonte: Elaboração Própria.

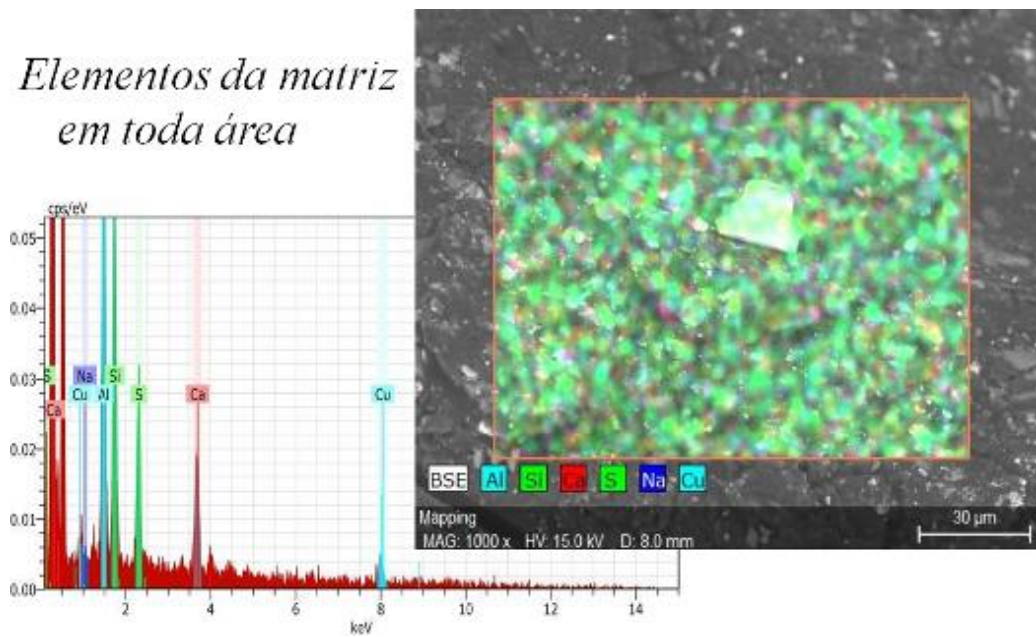
Figura 77.: MEV e EDS evidenciando a fibra de vidro e acrílico da lona.



Fonte: Elaboração Própria.

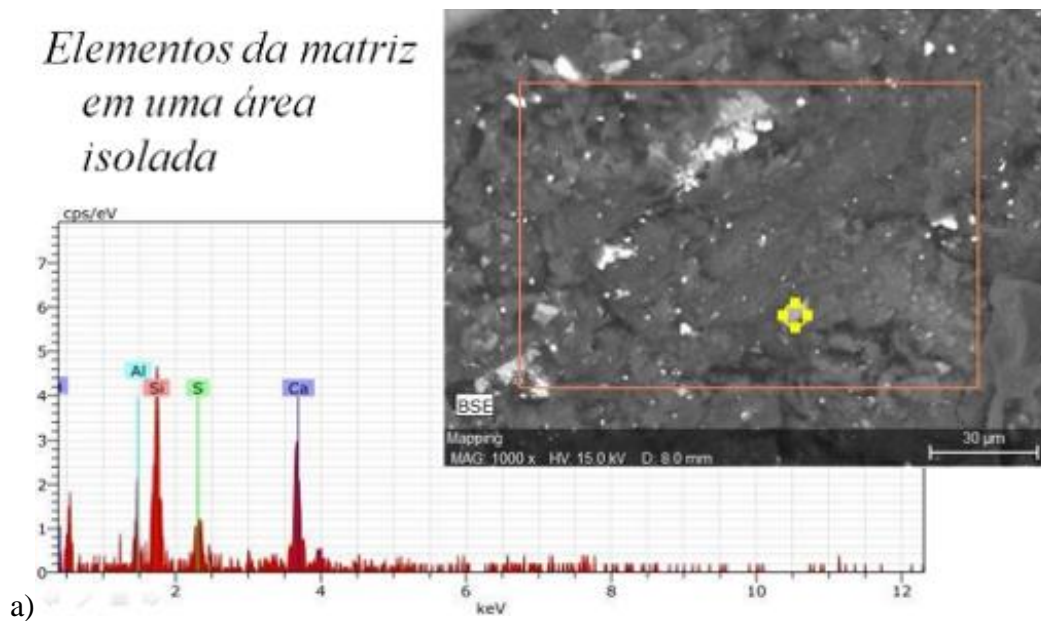
Já a matriz além do enxofre presente na borracha, apresentou de partículas fragmentadas de fibra de vidro(contendo Ca e Si) e carga mineral, com óxidos contendo Ti, como mostra as Figuras 78 e 79.

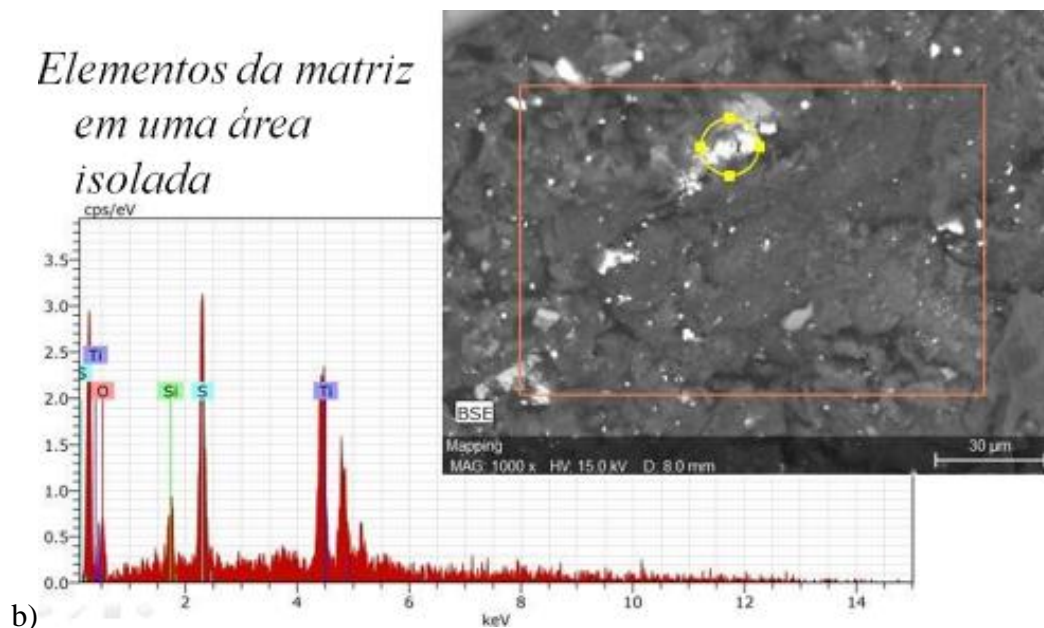
Figura 78.: MEV e EDS evidenciando a matriz da lona.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 79.: MEV e EDS evidenciando a matriz da lona. a) partícula alongada indicando a presença de Si e Ca (fibra de vidro picada); b) partículas contendo Ti e O.





Fonte: Elaboração Própria.

4.1.3. Resultado do Ensaio de Queima

No ensaio de queima foi verificada a quantidade de fibra inorgânica contida no material e a densidade dos compósitos estudados. A Tabela 7 mostra os 35% de fibra de vidro pertencente a composição da amostra PA6635GF. A Tabela 8 mostra que a amostra de lona de embreagem contém em média 50% de carga de reforço não inflamável.

Tabela 7.: Triplicata do teste de queima da amostra do PA66GF35.

Especificação	Unidade	Controle 01	Controle 02	Controle 03	Média
Porcentagem de Fibra	35% ± 1,5 %	36,0%	35,1%	35,4%	35,5%
Densidade	1,41 ± 0,02 g/cm ³	1,40	1,41	1,40	1,40

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 8.: Triplicata do teste de queima da amostra da lona de embreagem.

Especificação	Unidade	Controle 01	Controle 02	Controle 03	Média
Porcentagem de Fibra	50% ± 5 %	47,9%	51,6%	50,6%	50,0%
Densidade	1,64 ± 0,1 g/cm ³	1,61	1,61	1,62	1,61

Fonte: Elaboração Própria.

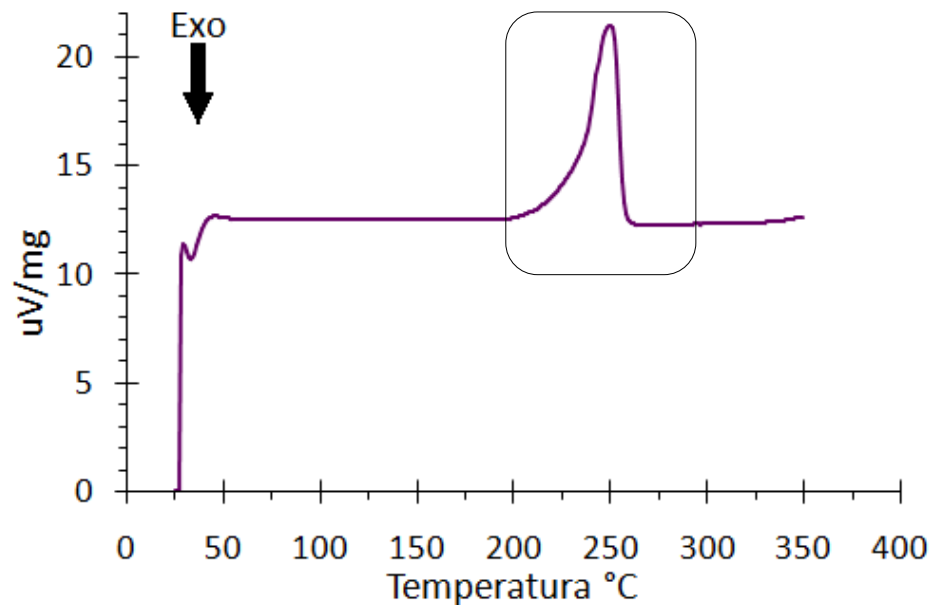
4.2. Estabilidade Térmica

4.2.1. Resultado da Análise por calorimetria diferencial exploratória DSC

A Figura 80 mostra a análise de calorimetria da amostra PA66GF35 na faixa de temperaturas 25 a 400°C. A única reação detectada foi um pico endotérmico evidenciado referente à fusão na temperatura de 260°C dentro da faixa esperada 250°C á 280°C (MARK, 1999).

No DSC do PA66 não tivemos variações entre as temperaturas de trabalho dos anéis que é entre 80°C á 150°C.

Figura 80.: Gráficos do ensaio de DSC do PA66GF35 ensaio feito com taxa de aquecimento dede 10°C/min.

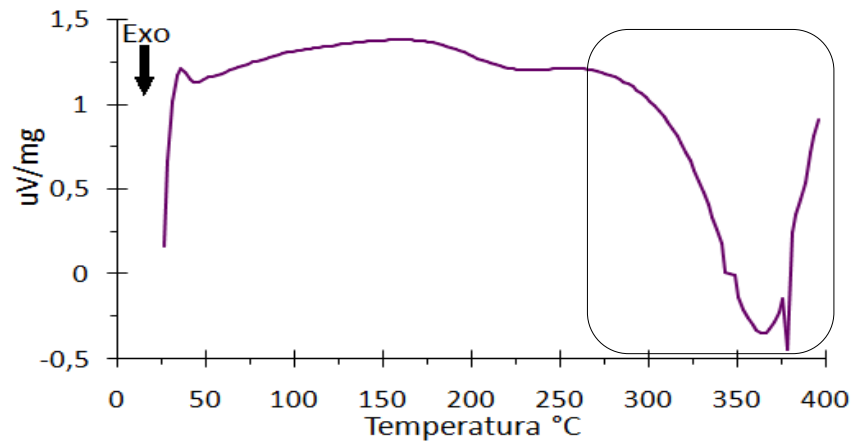


Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 81 é referente à curva de calorimetria diferencial de varredura do elastômero NBR, aparece uma importante reação em 370°C, onde representa a degradação do material.

No DSC do elastômero NBR não tivemos variações entre as temperaturas de trabalho dos anéis que é entre 80°C á 150°C.

Figura 81.: Gráfico do ensaio de DSC do elastômero NBR



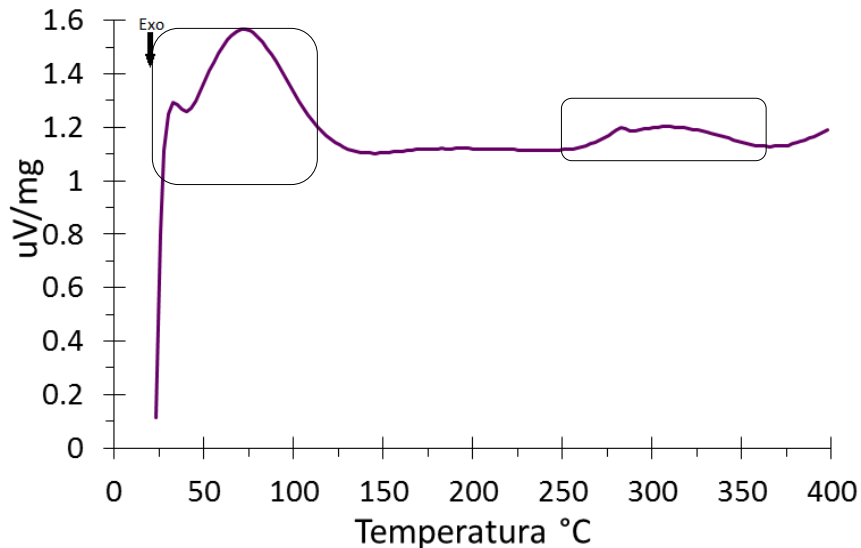
Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 82 é referente a curva de calorimetria diferencial de varredura da lona, temos dois picos exotérmico e um pico endotérmico evidenciados na figura. Nota-se um pico endotérmico na temperatura de 75°C evidencia uma provável cura da resina fenólica junto ao aditivo de proteção superficial conhecido como acetato de polivinila (PVA) presente no compósito. (BORGES, 2004e SAMUEL, 2013)

Os dois picos endotérmicos encontrados são vistos entre a temperatura de 270°C á330°C, representando uma possível decomposição térmica da fibra de acrílico e uma relaxação da fase amorfa, associada às fibras de aramida presentes no reforço da lona. (PATEL, 2014)

No DSC da Lona de embreagem tivemos variações perto da temperatura de trabalho que é 80°C, porém é apenas uma eliminação da proteção superficial, projetada apenas para proteger o produto durante o transporte, portanto essa evaporação em 75°C não terá influência em seu atrito e desgaste.

Figura 82.: Gráfico do ensaio de DSC da Lona de embreagem.



Fonte: Elaboração Própria

4.2.2. Resultado da Dureza Shore D para Ensaio de Envelhecimento térmico.

Considerando que a temperatura de trabalho possa variar entre 80°C e 150°C, foram realizados envelhecimentos nessas de temperaturas, com intervalo de controle de 17 horas até um tempo total de 85 horas. O mesmo que será utilizado nos testes tribológicos.

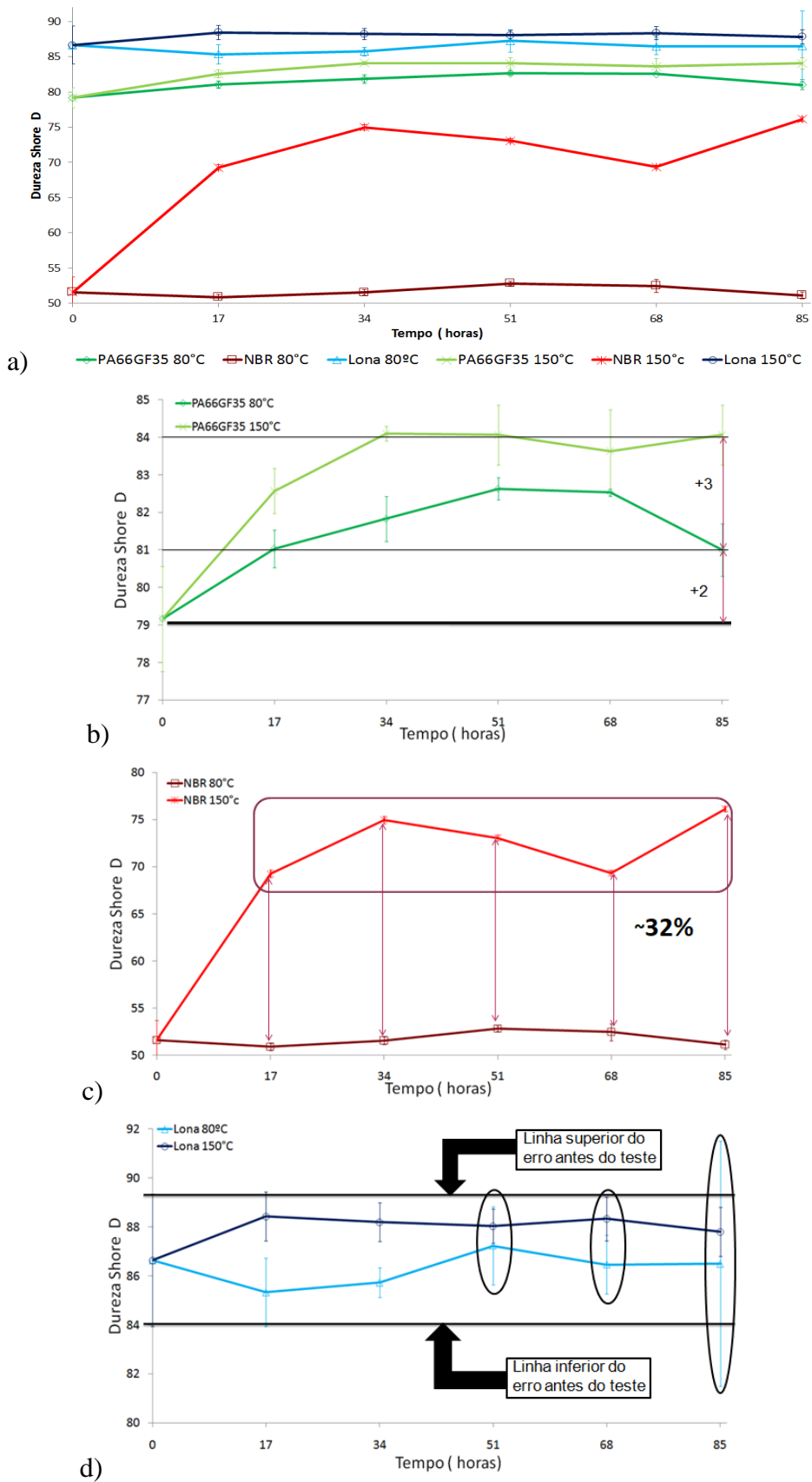
A Figura 83a mostra o comportamento entre a dureza do material e o seu envelhecimento térmico, para os três materiais testados.

Podemos observar na Figura 83d que a lona de embreagem não teve nenhuma variação significativa na sua dureza, comparável aos resultados de (SOUZA, 2003) e conforme evidenciado na espectroscopia infravermelho (FTIR) mostrado na Figura 87.

Para o PA66GF35 a Figura 83b evidencia nas duas temperaturas ensaiadas um aumento de dureza em aproximadamente 4% e 7% nas temperaturas respectivas de 80°C e 150°C, esse pequeno aumento na sua dureza deve-se devido a um aumento de sua cristalinidade em razão com a coloração alterada após o envelhecimento (Figura 85) e conforme evidenciado na espectroscopia infravermelho (FTIR) mostrado na Figura 84b.

Para o elastômero NBR mostrado na Figura 83c não tivemos mudanças significativas para o envelhecimento na temperatura de 80°C, porém para o envelhecimento á 150°C podemos observar que aumentou sua dureza em torno de 32%. Observou-se o endurecimento do elastômero NBR associado à decomposição, perda de ligações da cadeia principal levando a um aumento na sua cadeia cruzada conforme evidenciado na espectroscopia infravermelho (FTIR) mostrado na Figura 86.

Figura 83.: Envelhecimento térmico em relação a dureza do material a) geral, b) PA66GF35, c) Elastômero NBR e d) Lona de embreagem.



Fonte: Elaboração Própria.

4.2.3. Resultado da Espectroscopia nas faixas de luz infravermelho para Ensaio de Envelhecimento térmico.

A análise de FTIR por ATR foi realizada com o objetivo de verificar se durante o envelhecimento ocorreram mudanças no estado de ligação química das amostras. Foram realizados vários ensaios em refletância antes e após envelhecimento de 85 horas, buscando os parâmetros de análise que melhor identificassem as bandas de ligação que se alteraram após o envelhecimento térmico para cada tipo de amostra. A seguir são apresentadas as séries de ensaio mais representativas.

A Figura 84 mostra os espectros em ATR da amostra PA66GF35, podemos observar na Figura 84a os picos em 594/cm e 520/cm que são característicos de ligações C=O com vibrações fora do plano (JIA, 2013 e EVORA, 2002). Percebe-se que para a amostra com o envelhecimento de 80°C os picos tendem a diminuir e já com 150°C esses picos desaparecem do espectro.

Na Figura 84b nota o pico de 1273/cm que representa a amida com ligações C-N-H, presentes na poliamida 66. No detalhe evidenciamos o pico de 1197/cm onde representa a fase cristalina e o segundo pico de 1180/cm representa a fase amorfa da poliamida (EVORA, 2002), notando-se que amostra envelhecida á 150°C apresenta um aumento do pico cristalino, explicando o aumento da dureza mostrado na Figura 83b.

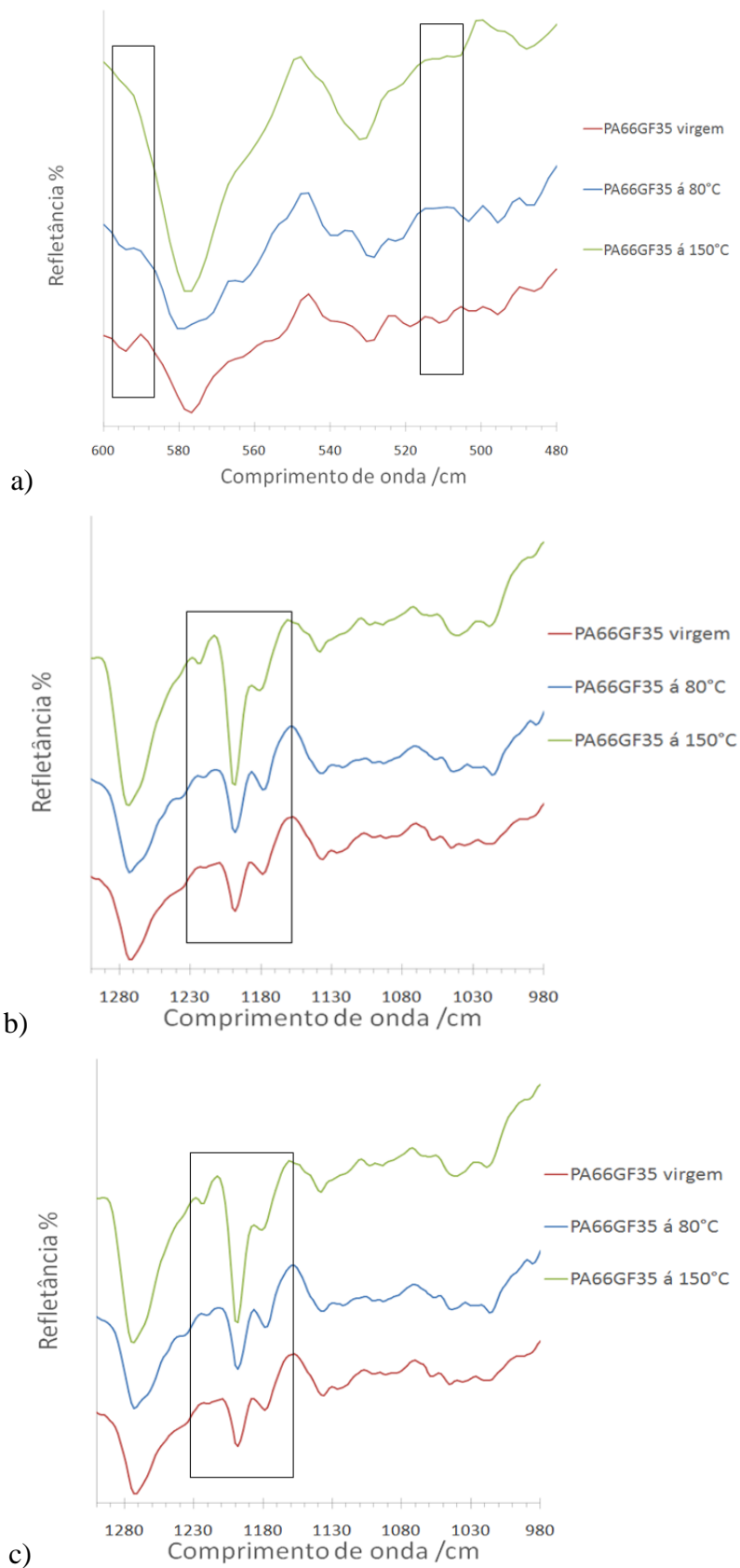
Segundo Canevarolo, 2006, materiais cristalinos tentem a ter mais opacidade que materiais amorfos, portanto a amostra envelhecida á 150°C apresentou alteração em sua coloração, podendo ter correlação pelo aumento do pico cristalino de 1197/cm (ver Figura 85).

Nota-se dois picos no comprimento de onda de aproximadamente 1040 e 1135/cm, esses picos são referentes a fibra de vidro presente no compósito de PA66GF35. (EVORA, 2002)

Na Figura 84c nota-se a maior banda de 3299/cm atribuída às vibrações de alongamento da ligação N-H, também muito característico das poliamidas temos observa-se as bandas selecionadas de 2935 e 2864/cm fazem parte da ligação H-C-H no plano de estiramento das vibrações assimétrico e simétrico. (WU, 2003 e WIEBECK, 2005)

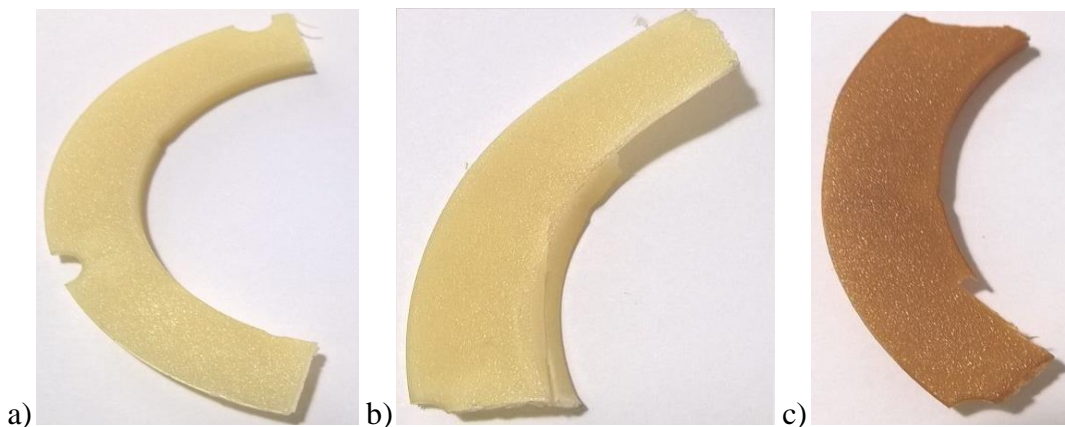
Nos dois picos evidenciados na Figura 84 c temos uma notável mudança na relação da proporcionalidade do tamanho da onda entre os dois picos, de forma que quanto maior a temperatura de envelhecimento, o pico de 2928/cm assimétrico tende a aumentar mais que o pico ao lado de 2864/cm simétrico. (WU, 2003 e WIEBECK, 2005)

Figura 84.: Comparação dos Espectros FTIR por ATR da PA66GF35 por refletância.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 85.: Foto do anel de PA66GF35: a) antes do envelhecimento, b) após o envelhecimento a 80°C e c) após o envelhecimento a 150°C.



Fonte: Elaboração Própria.

Para a amostra de NBR (Figura 86) nota-se que os espectros das amostras recém processada e envelhecida a 80°C mantiveram uma curva parecida, já a amostra tratada a 150°C teve alterações significativa no seu espectro se compararmos com as amostras envelhecidas.

A Figura 86a o pico de 960/cm é relativo à vibração angular no plano do hidrogênio á ligação dupla de dieno =C-H, pertencente a estrutura do butadieno do NBR. Este pico muito bem pronunciado na amostra virgem e a 80°C, porém quase desaparece na amostra envelhecida á 150°C. (LIU J, 2016)

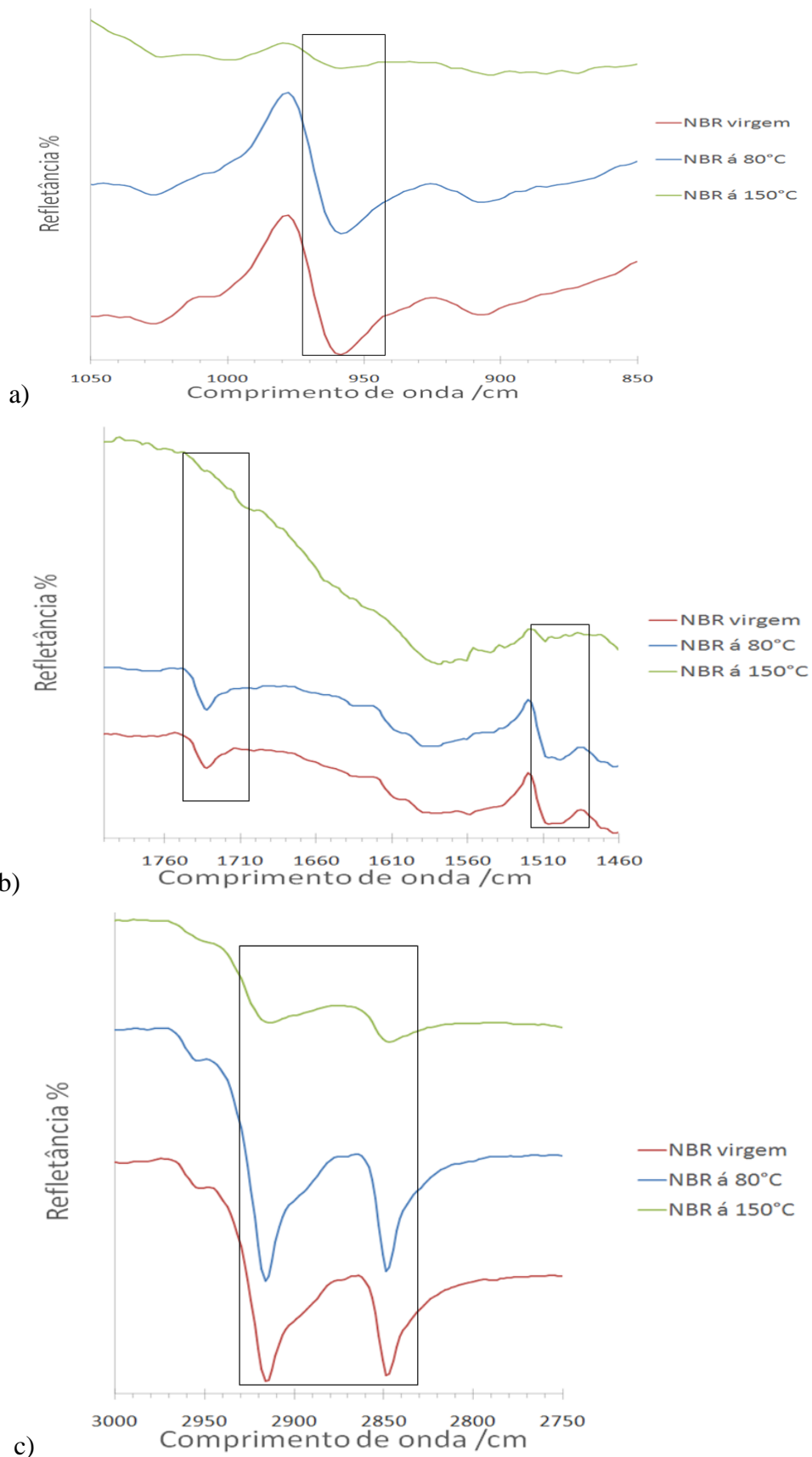
A Figura 86b mostra no detalhe do pico em 1730/cm evidenciando um possível ácido carboxílico –COOH- presente da ligação do NBR com o aditivo negro de fumo. O outro pico evidencia em 1510/cm representando ligações CN presente na acrilonitrila.

Nos dois casos evidenciados da Figura 86b temos o desaparecem dos picos após o envelhecimento térmico á 150°C. (LIU J, 2016)

Na figura 86c as bandas selecionadas de 2840 e 2910/cm fazem parte da ligação C-H de carbono terciário alifático. Nota-se que o envelhecimento á 80°C não apresentou mudanças em relação a amostra virgem, porém no envelhecimento térmico á 150°C os picos diminuíram consideravelmente. (LIU X, 2016 e LIU J, 2016)

Observamos nos gráficos da Figura 86 a, b e c o mesmo fenômeno de diminuição dos picos após envelhecimento á 150°C, essa perda dos picos principais do elastômero NBR, essas perdas de picos leva a uma degradação térmica no material, explicando o endurecimento do material mostrado na Figura 83c.

Figura 86.: Comparação dos Espectros FTIR por ATR do elastômero NBR refletância.



Fonte: Elaboração Própria.

Pode-se observar na Figura 87a que os picos da lona não tiveram alterações em suas bandas principais entre a amostra virgem comparada com as envelhecidas a 80°C e 150°C, portanto não existe degradação química aparente nas amostras envelhecidas.

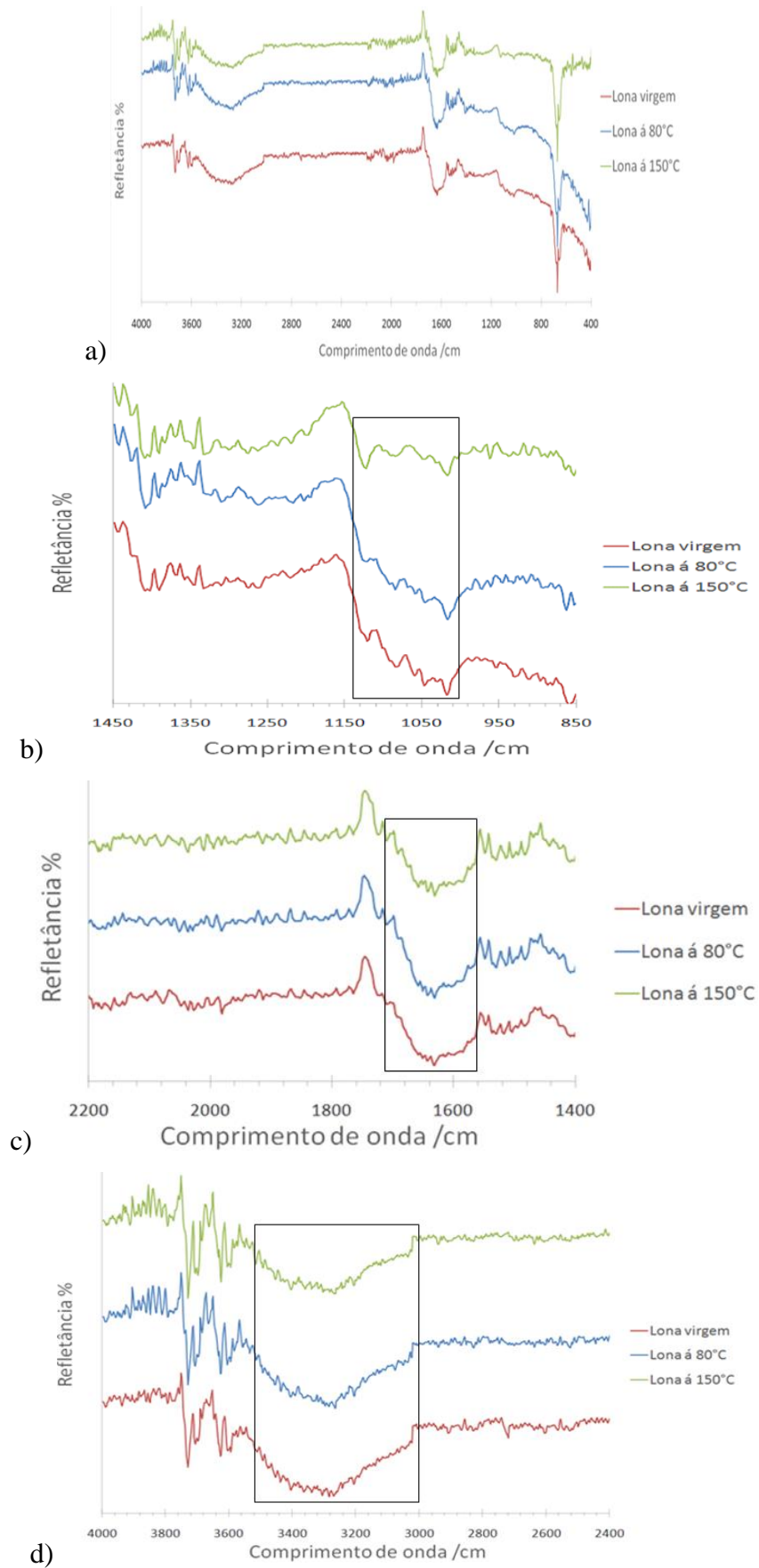
Na Figura 87b nota-se alguns picos no comprimento de onda de aproximadamente 1020 até 1110/cm, esses picos são referentes a fibra de vidro presente no compósito de Lona. (BORGES, 2004; SOUZA, 2003 e MA, 2013)

A Figura 87c motra a banda de 1640/cm que é proveniente da matriz do compósito elastômero NBR, essa banda pertence é da região da carbonila correspondente à formação de ácidos saturados. (BORGES, 2004; SOUZA, 2003 e MA, 2013)

Na Figura 87d trás a banda de 3300/cm é proveniente da matriz do compósito elastômero NBR, atribuída às vibrações de hidrogênio ligado e N-H alongamento. (BORGES, 2004; SOUZA, 2003 e MA, 2013)

Todas essas bandas evidenciadas na Figura 87b, c e d tem uma coisa em comum, seus espectros não apresentaram alterações significativas após os envelhecimento, portanto pode-se concluir que não houve nenhuma degradação nestas amostas envelhecidas, o mesmo resultado obteve-se na dureza do material com mostra a Figura 83b.

Figura 87.: Comparação dos Espectros FTIR da Lona por refletância.



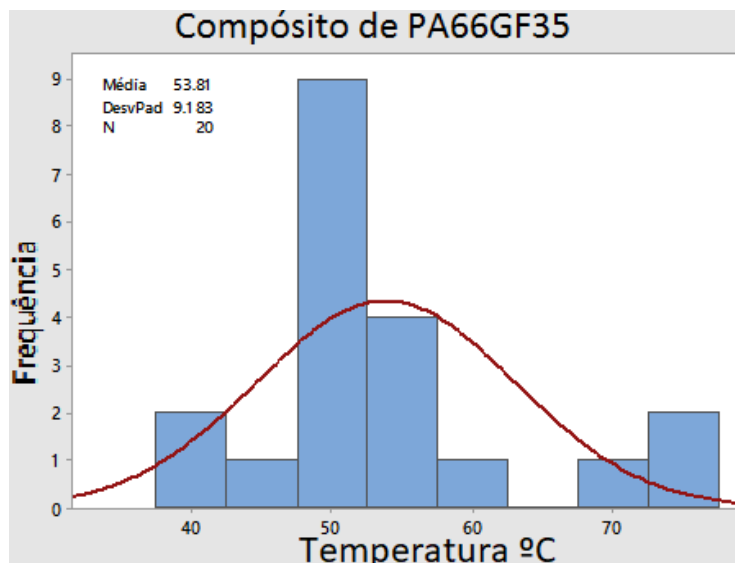
Fonte: Elaboração Própria.

4.3. Ensaio tribológico

4.3.1. História térmica gerada no ensaio tribológico.

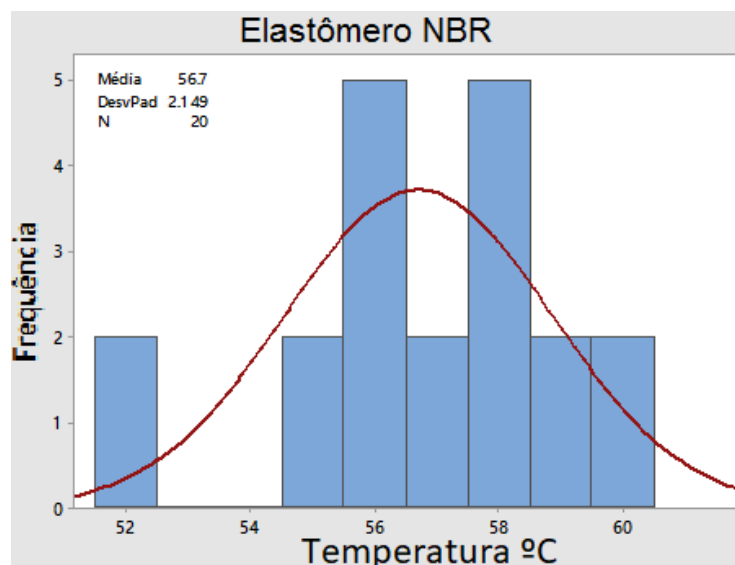
As Figuras 88, 89 e 90 mostram o histórico de temperaturas medidas durante o ensaio de atrito e desgaste até 5 milhões de ciclos de rotação. Podemos observar que a máxima temperatura do ensaio encontrada não passou dos 80° Celsius, e que a média das temperaturas nos ensaios dos três materiais foi inferior a utilizada no envelhecimento térmico.

Figura 88.: Curva de Gauss da amostra de PA66GF35 durante o ensaio tribológico.



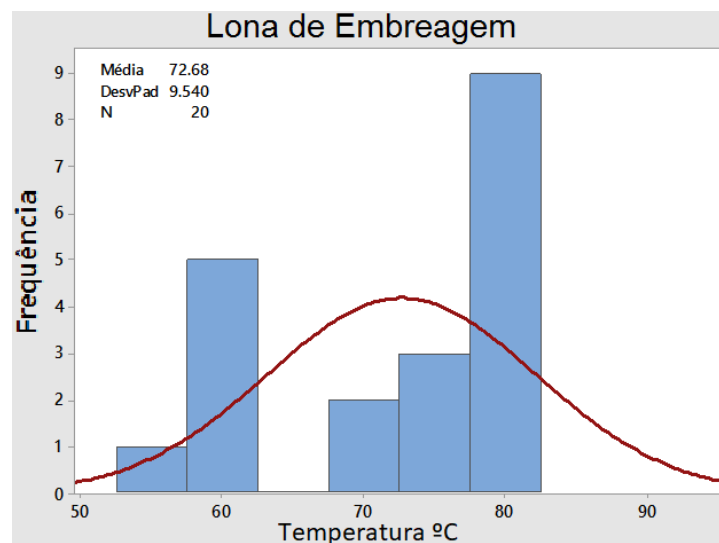
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 89.: Curva de Gauss da amostra do elastômero NBR durante o ensaio tribológico.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 90.: Curva de Gauss da amostra de Lona de Embreagem durante o ensaio.



Fonte: Elaboração Própria.

4.3.2. Dureza gerada após o ensaio tribológico.

A análise de Dureza shore D que foi realizada na superfície de contato das amostras, antes e após o ensaio tribológico (ensaio de desgaste após 5 milhões de ciclos). A Figura 91 mostra o anel de atrito da Lona de embreagem sendo o único material que resistiu a todo teste, observamos que a sua dureza apresentou valor parecido com a peça comparado com a dureza da peça virgem. O resultado da dureza no envelhecimento térmico mostrou o mesmo comportamento e resultado da dureza após ensaio de desgaste.

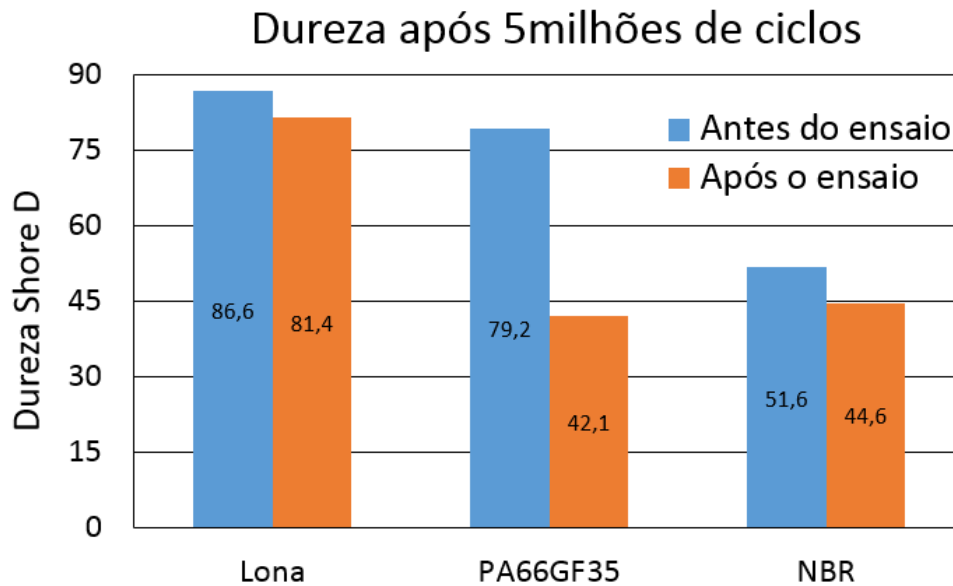
A amostra do Elastômero NBR (Figura 91) apesar de ter enrijecido e perdido a propriedade elástica apresentou uma queda na sua dureza de 13,5%, ao contrário do envelhecimento térmico que o mesmo ganhou uma dureza em 32%. Explicável, pois na análise de MEV e EDS após o ensaio de desgaste evidencia o desgaste caracterizado por adesão e trincamento levando a acreditar que este último seja o motivo da perda de dureza (Figura 101 e 102).

O PA66GF35 apresentou quase a metade da dureza após o ensaio de desgaste (Figura 91) comparado ao controle feito antes do teste tribológico, levando a acreditar a perda desta propriedade foi à causa da taxa de desgaste observada. (Figura 96 e 97).

O motivo para a queda de dureza do PA6635GF (Figura 91) pode estar correlacionado com o fato da temperatura de trabalho ser superior a temperatura de transição vítrea deste

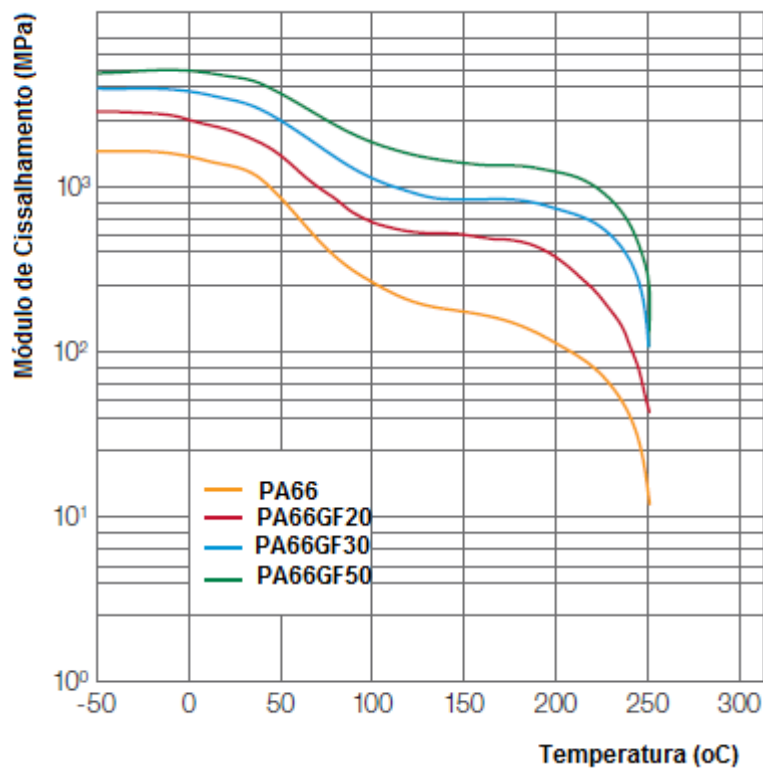
compósito, como mostra a Figura 92a, (BASF). Acima de Tg o material perde não só rigidez, mas também reduz o limite de escoamento e tem comportamento borrachoso, apresentando alta plasticidade, mas a deformação plástica, e a eventual oxidação do material levariam a um aumento de dureza. Outro fator importante que pode interferir nesta análise e não foi controlado neste trabalho é a absorção de umidade. A umidade tem muita influência tanto na temperatura de transição vítrea quanto no limite de escoamento, como mostra a Figura 92b.

Figura 91.: Controle da Dureza após termino do ensaio tribológico.

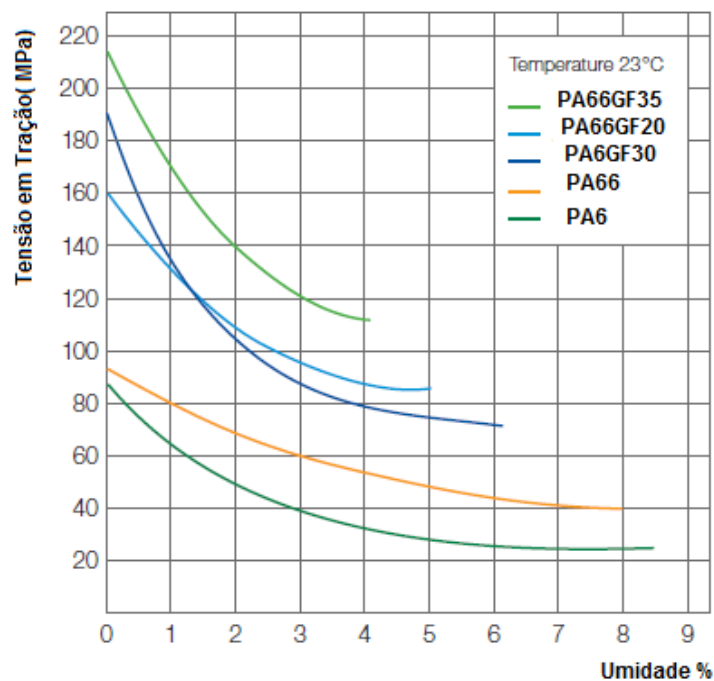


Fonte: Elaboração Própria.

Figura 92.: Propriedades Mecânicas do da poliamida 6.6 reforçada com fibras de vidro: a) Variação do módulo elástico em função da temperatura e b) Variação do limite de escoamento com o teor de umidade



a)



b)

Fonte: BASF

4.3.3. Morfologia e perda de volume ensaio tribológico.

Durante o ensaio de desgaste foram introduzidos dois anéis de atrito no conjunto contra-corpo de aço - anel de atrito - contra-corpo de aço, conforme mostrado na Figura 93. Foram feitos controles de histerese a cada 1 milhão de ciclos e após 5 milhões de ciclos o conjunto foi desmontado para medição de desgaste por perda de massa.

Nos novos motores três cilindros o anel de atrito trabalha com maior carga, velocidade de deslizamento e amplitude de atrito comparado ao requisito do carro de quatro cilindros, pois motores três cilindros trabalham com rotações muito mais altas que os convencionais.

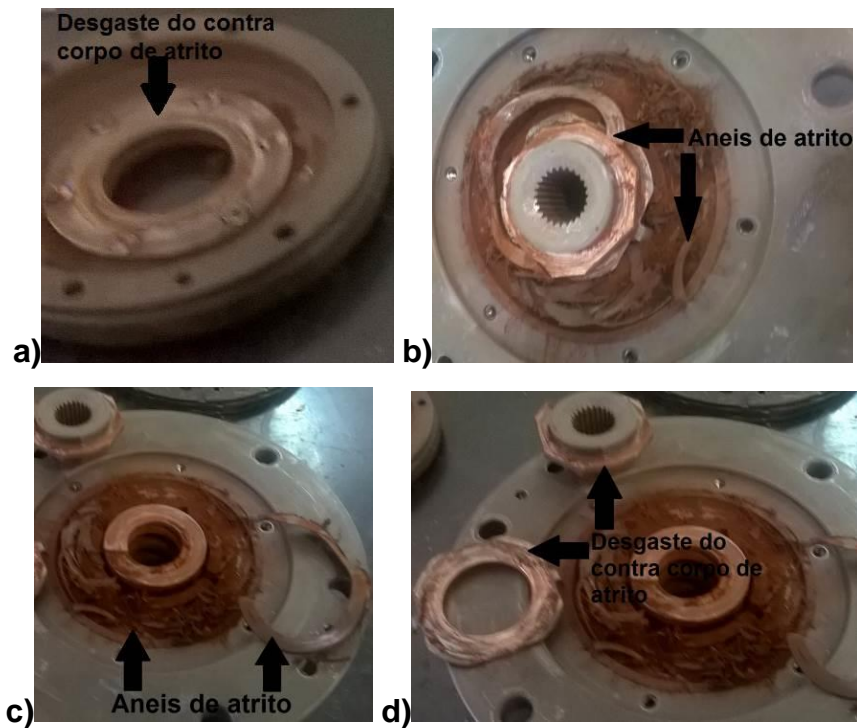
Para simular esta nova condição, os ensaios utilizaram parâmetros de pressão, velocidade e distância de percurso, muito maior do que os encontrados em campo para os carros quatro cilindros. Por exemplo, no trabalho de ROSA (2014), foram utilizadas velocidade de 14.05 m/min e carga de 600 N. Já neste trabalho a velocidade aumentou para 23,4m/min e carga de 700N, no mesmo dispositivo de ensaio.

As Figuras 93, 94 e 95 mostram os conjuntos desmontados após o ensaio tribológico: a) o contra corpo de aço, b e c os anéis de atrito d o segundo contra corpo de aço.

Observou-se que os anéis de atrito das amostras PA66 e NBR (Figuras 92 e 93 b e c) não resistiram a 5 milhões de ciclos e fraturaram no processo, mostrando sinais de deformação por cisalhamento intenso. A ruptura dos anéis ocorreu entre 2 milhões de ciclos. Apenas o anel de Lona conseguiu terminar o teste sem fratura.

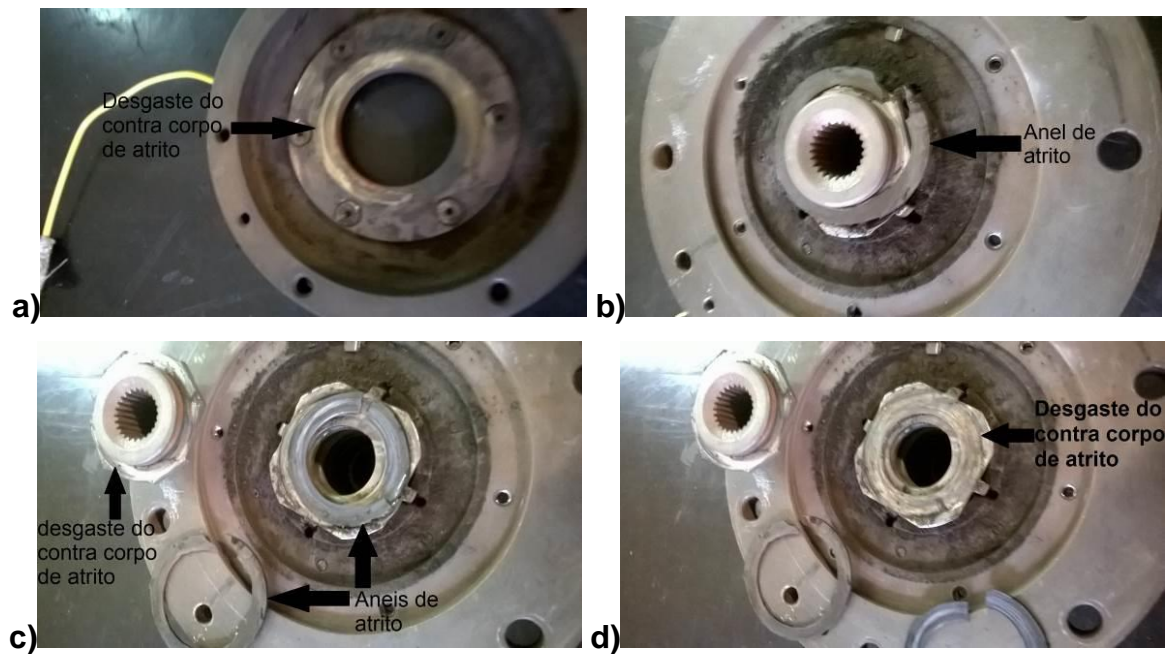
Em todos os conjuntos foi também observada a produção de material particulado resultante da fragmentação dos anéis de atrito.

Figura 93.: Fotografia do anel de atrito PA66GF35 após o ensaio tribológico.



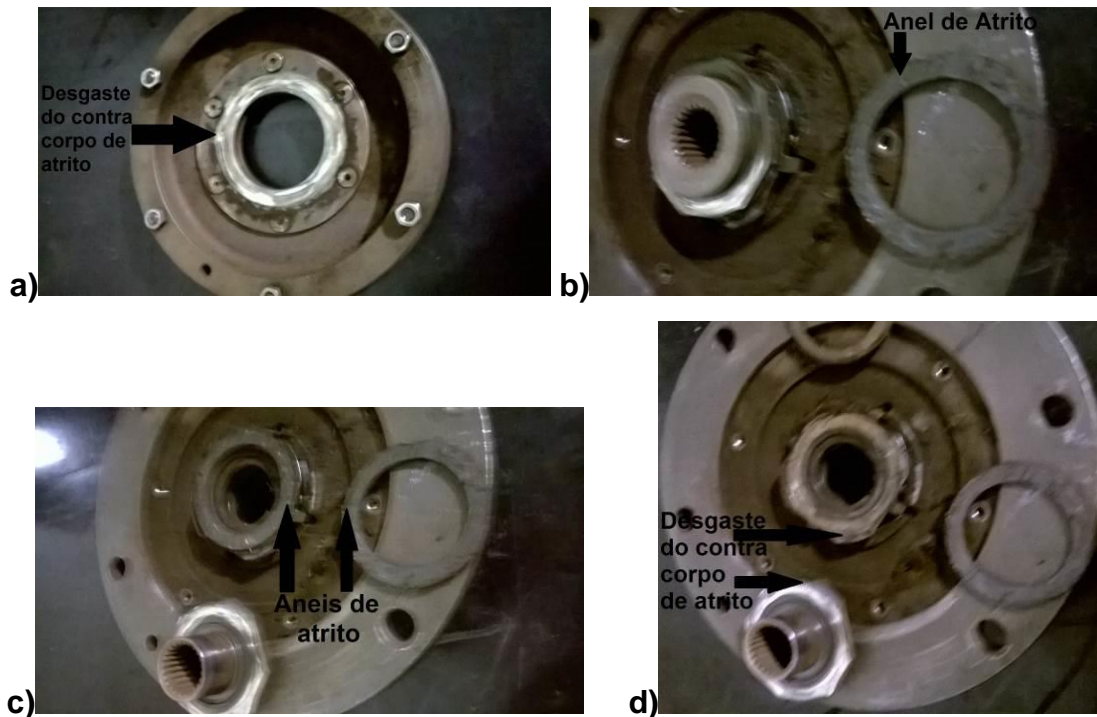
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 94.: Fotografia do anel de atrito Elastômero NBR após o ensaio tribológico.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 95.: Fotografia do anel de atrito da Lona de Embreagem após o ensaio tribológico.



Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela 09 resume a redução de espessura dos contra - corpos metálicos e dos anéis de atrito. A perda de volume em todos os casos foi muito inferior à dos anéis poliméricos.

Tabela 9.: Resultado do desgaste tribológico.

Amostras	Contra corpo		Aneis de atrito				
	Diferença entre Volume antes e após 5 milhões		Volume Inicial	Volume após 1 milhão		Volume após 5 milhões	
	mm ³	Desvio padrão	mm ³	mm ³	Desvio padrão	mm ³	Desvio padrão
PA66GF35	76	9	1.201	583	155	515	45
NBR	37	8	1.149	781	53	684	24
Lona	159	11	1.151	965	36	564	41

Fonte: Elaboração Própria.

O gráfico da Figura 95 mostra que o desgaste dos três materiais após o ensaio de 5 milhões de ciclos, exigido no ensaio segundo a norma DIN50320, 1979.

Tanto para o anel de PA66GF35, quanto para o anel de NBR observou-se o rompimento do anel e desprendimento durante o ensaio, esse rompimento aconteceu entre 2 milhões de ciclos, fazendo que se perca a função de estabilizar o atrito. As porcentagens de desgaste, do ensaio, portanto poderiam ter sido maiores e os resultados de perda de volume neste caso não são confiáveis como comparativo entre os três materiais.

A Lona de embreagem foi o único material que apresentou um desgaste real, o mesmo obteve um desgaste 51% e uma alteração menor que 20% no seu coeficiente de atrito, valores que encontra-se dentro da norma interna da empresa Schaeffler A084C0071E. A Lona não sofreu modificações na dureza Figura 91, portanto apresentou estabilidade mecânica durante o ensaio.

A explicação do resultado da Lona de embreagem para o desgaste e o envelhecimento térmico, é a grande quantidade de fibras com diferentes propriedades, como o cobre que foi responsável por dissipar o calor e melhor a resistência ao desgaste, Fibra de vidro que é diminuir o desgaste, e a Fibra de aramida tem a função de resistência a ruptura, aumentando a resistência mecânica do anel de atrito.

O anel de PA66GF35 e o NBR não resistiram ao ensaio de desgaste, pois utilizamos parâmetros de pressão, velocidade e distância de percurso, muito maiores do que os encontrados em campo para os carros quatro cilindros.

O PA66GF35 obteve um grande desgaste devido ao favorecimento das condições de testes como uma pressão específica muito alta, conforme cita os artigos dos autores BO Um (2007) e Unal (2006) uma maior carga tem a tendência a um maior desgaste.

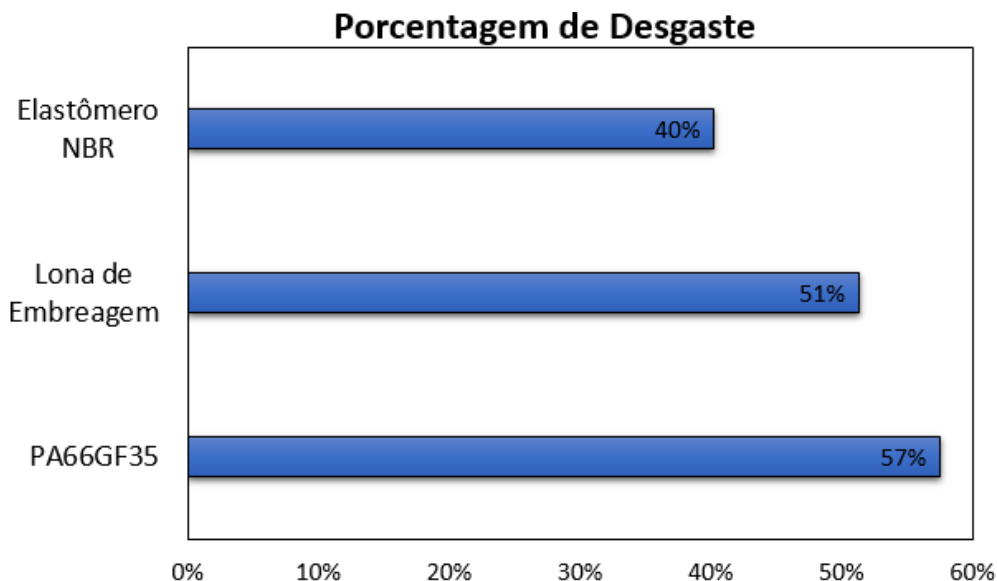
Podemos relacionar a dureza do PA66GF35 após o teste de desgaste para explicar o desgaste obtido, onde o material ter perdido metade de sua dureza (Figura 91) influencia diretamente no seu desgaste de mais da metade de seu volume inicial.

Com o Elastômero NBR também obteve um grande desgaste devido ao favorecimento das condições de testes com grande pressão específica, conforme mostra o autor Wang (2015), outro fator que influenciou diretamente é a alta velocidade de deslizamento (DONG, 2015).

O elastômero de NBR poderia ter um maior desgaste no ensaio tribológico, porém no MEV (Figura 101) temos a presença de tribofilme no NBR, foi através do EDS (Figura 102) detectada a presença de Fe, transferido pelo contra-corpo devido ao mecanismo de adesão, gerando uma camada de proteção ao desgaste, com isso mesmo sendo o material mais crítico

se olharmos a dureza e resistência a temperatura como observado no ensaio de envelhecimento, o desgaste ficou menor que o material PA66GF35 (Figura 96 e 97).

Figura 96.: Taxa de desgaste após 5.000.000 ciclos.



Fonte: Elaboração Própria.

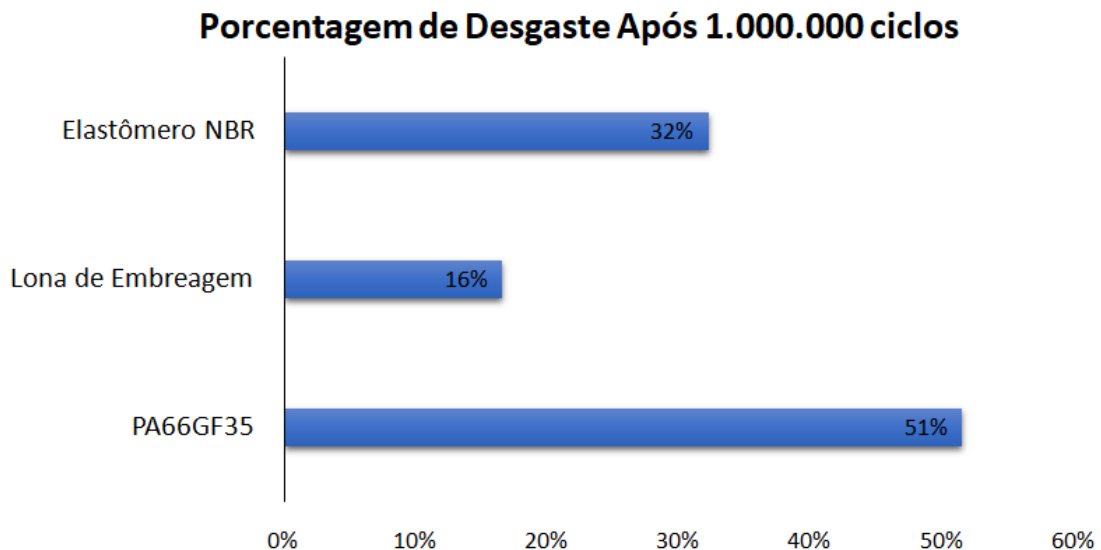
Um segundo ensaio interrompido em um milhão de ciclos foi realizado para uma comparação da taxa de desgaste. Neste caso os anéis ainda se encontravam íntegros. O Elastômero NBR rompeu-se aproximadamente 1,5 milhão, já o PA66GF35 entre 2 milhões de ciclos. O gráfico da Figura 97 mostra o resultado de desgaste deste segundo ensaio.

A maior parte do desgaste dos materiais foi concedida até um milhão de ciclos, ou seja, após isso temos o rompimento dos anéis de atrito, mascarando desgaste real dos anéis de PA66GF35 e o elastômero NBR (Figura 97).

A explicação para o desgaste do PA66GF35 e do elastômero NBR continua sendo os mesmos do teste após 5 milhões de ciclos citado acima, pois é a mesma configuração nos dois testes mudando apenas o tempo final de ciclagem.

A amostra da Lona de embreagem o desgaste foi muito menor que os demais anéis. Observa-se também que o desgaste da lona em um milhão de ciclo (Figura 97) ficou perto de um quinto do desgaste do ensaio de cinco milhões de ciclos (Figura 96), fato que não ocorreu para os demais anéis de atrito.

Figura 97.: Taxa de desgaste após 1.000.000 ciclos.



Fonte: Elaboração Própria.

4.3.4. Coeficiente de atrito gerado durante o ensaio.

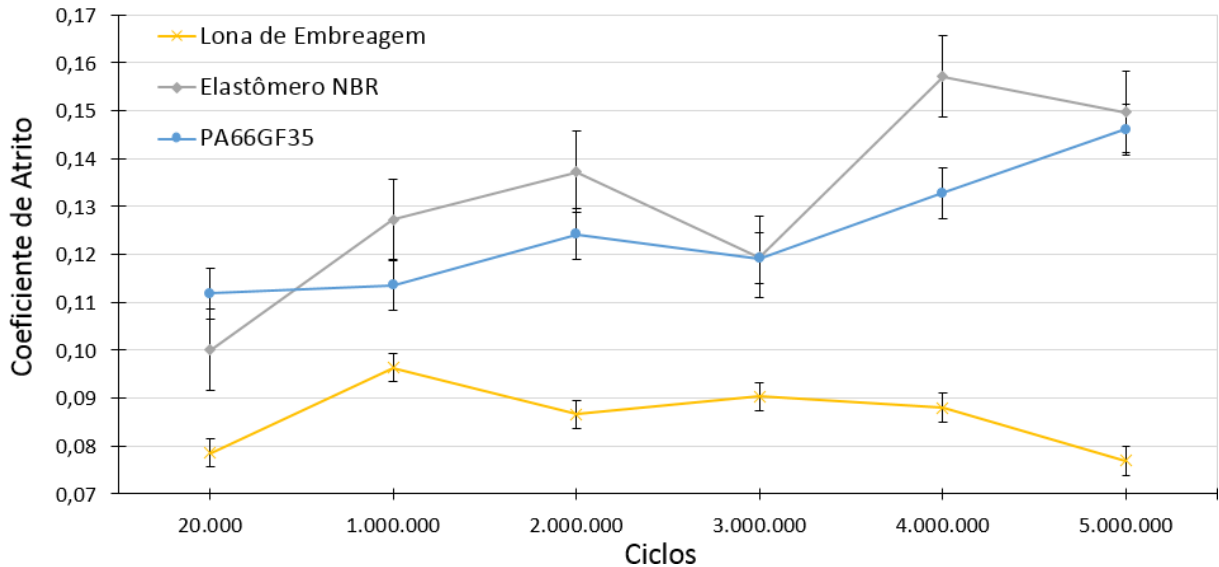
Podemos observar na Figura 98 que o coeficiente de atrito gerado durante todo o teste ficou estável para o anel de atrito da Lona de revestimento se considerar o erro padrão mostrado no gráfico. Os valores medidos para o PA66GF35 e o NBR são inferiores aos obtidos por Rosa (2014) no mesmo dispositivo. O baixo valor de coeficiente de atrito gerado é influenciado pela alta pressão específica, temperatura e a velocidade de deslizamento como trazem os autores Rodrigues (2007); Pritzelwitz (2010) e Gopal (1995).

Porém para o anel de PA66GF35 observamos um aumento a partir do segundo milhão de ciclos e o Elastômero NBR observou um aumento a partir do primeiro milhão. Justificável, pois com o rompimento dos anéis ocorridos entre 2 milhões de ciclos, temos um contato da área de atrito mascarado, criando um atrito adicional entre os contra-corpos metálicos. Portanto teremos um desgaste parcial dos anéis, ao mesmo tempo perdemos a função primária dos anéis que é estabilizar, o que inviabiliza o uso destes materiais nas condições mais intensas encontradas nos motores de três cilindros. Tendo uma variação maior que 20% no seu coeficiente de atrito os valores que encontra-se fora da norma interna da empresa Schaeffler A084C0071E (Figura 98).

A Lona de embreagem obteve o menor atrito entre os outros materiais, um dos motivos para isso ocorrer são as fibras de acrílico e aramida presentes no material que além de

estabilizar o atrito, tem um coeficiente de atrito baixo, outro motivo é a alta pressão aplicada de 900N/m² no sistema de atrito.

Figura 98.: Coeficiente de atrito durante o ensaio.



Fonte: Elaboração Própria.

4.3.5. Análise das superfícies de desgaste.

As análises do MEV e EDS foram realizadas em uma superfície de contato após o ensaio tribológico.

Nota-se nas imagens do MEV para o PA66GF35 das figuras 99a e b que as superfícies desgastadas têm riscos de abrasão provocados pelas asperezas do contra corpo metálico, apresentando um desgaste abrasivo, com produção de sulcos, como mencionado nos artigos de Yu Lan (2016) e Unal, (2006).

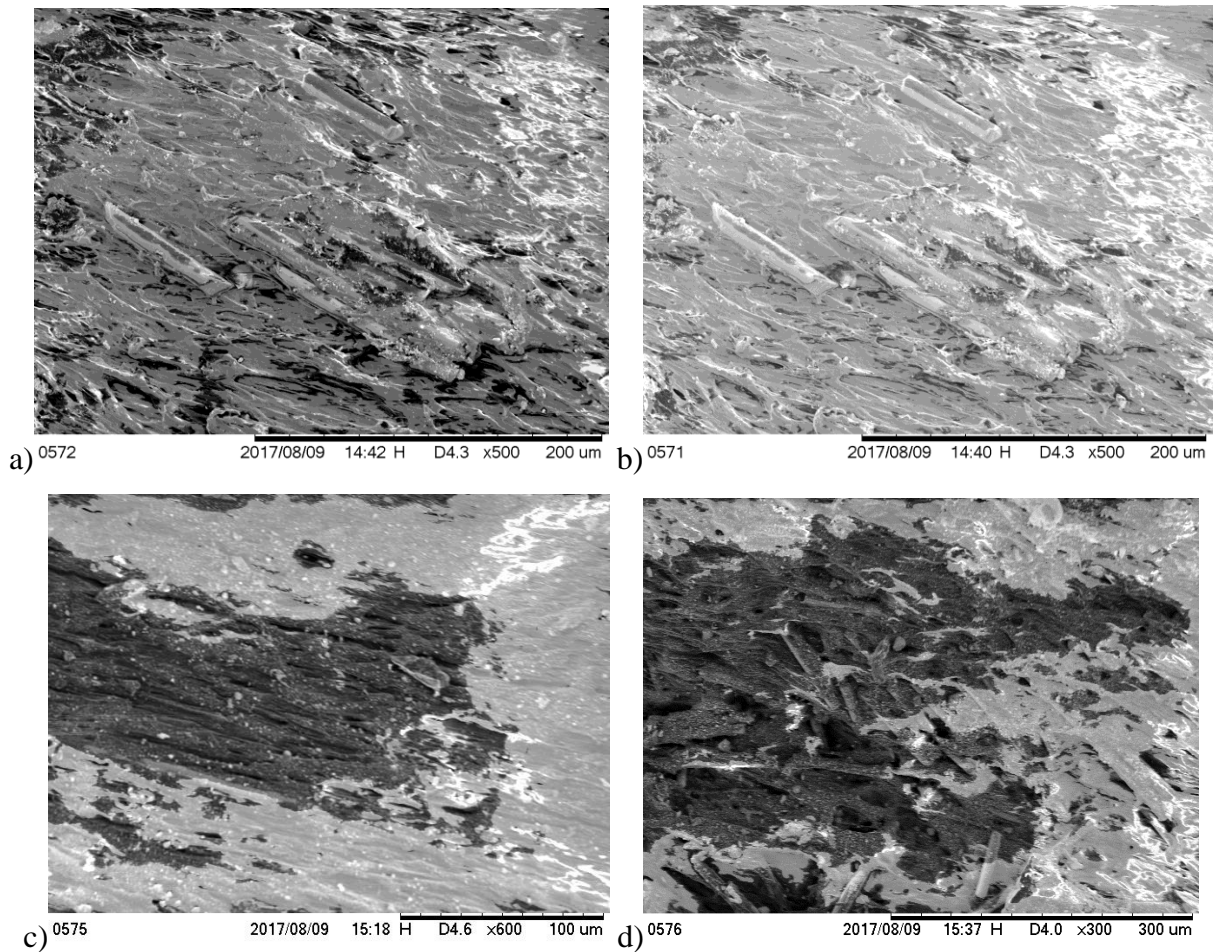
A Figura 99c e d evidencia a ocorrência de deformação plástica, também observado nos artigos de Pogacnik (2016) e Unal (2012). Parte do processo de geração de partículas de desgaste conhecido como tribofilme (debris) ou detrito de desgaste. A deformação plástica observada levaria a um aumento de dureza e não à diminuição medida experimentalmente após o ensaio.

Observa-se na figura 100a, b e c as análises de EDS, temos a presença de elemento de ferro no tribofilme, resultante do desgaste do contra corpo metálico.

A Figura 100b e c nota-se muita presença de oxigênio e carbono, elementos que formam a carbonila, mostrando uma degradação do anel de atrito após o teste. A degradação por reação triboquímica é, portanto, um dos mecanismos de desgaste ativos neste sistema.

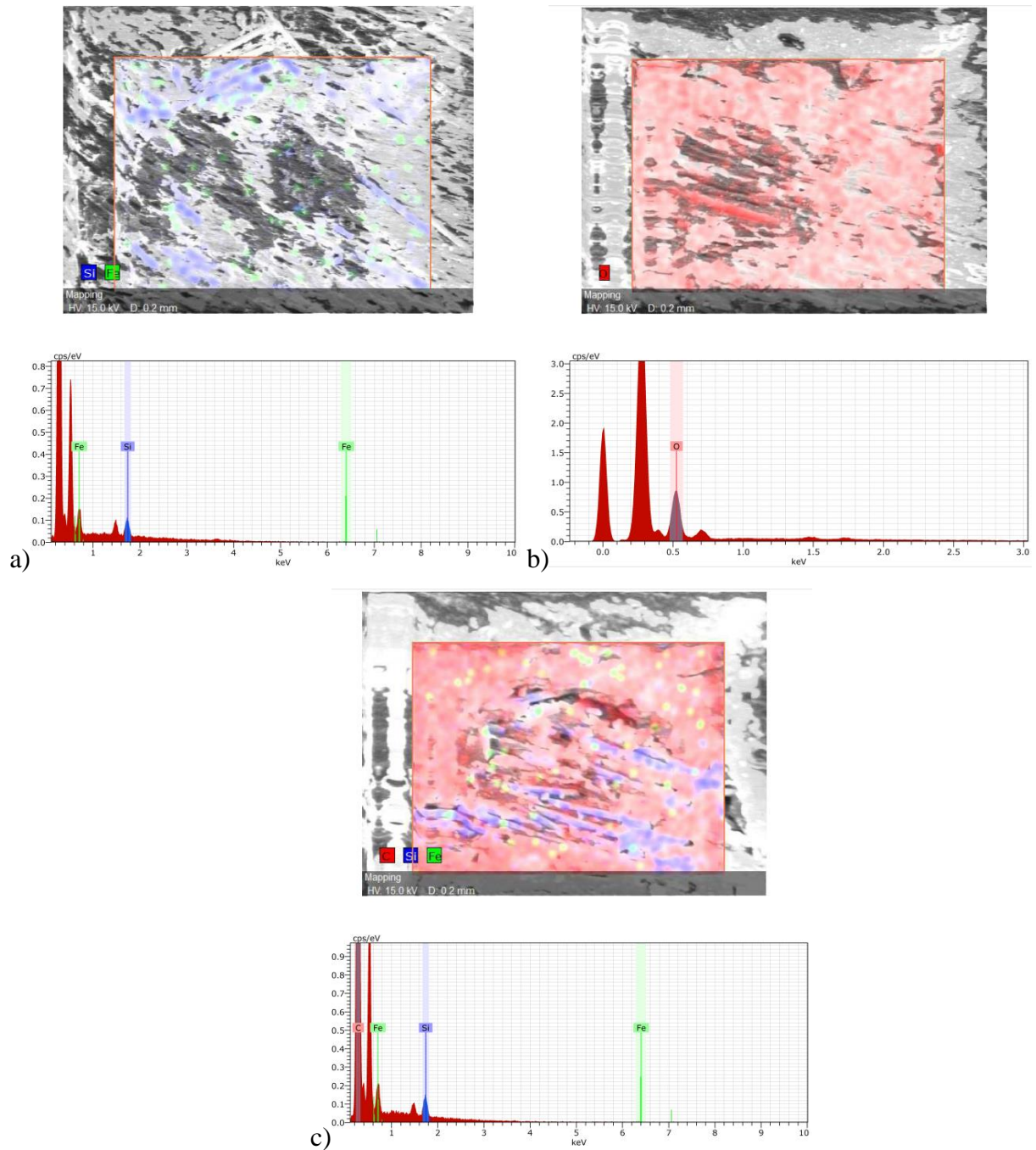
Apesar de ter dureza relativa próxima à lona a matriz de poliamida sofreu corte e sulcamento levando a uma taxa de desgaste mais elevada, isto pode estar associado à queda do módulo elástico e do limite de escoamento na temperatura do ensaio (BASF).

Figura 99.: MEV da superfície de atrito após teste da Poliamida.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 100.: EDS evidenciando a superfície da PA66GF35 após ensaio tribológico.a) partícula de ferro; b) e c)tribofilme e degradação do anel.



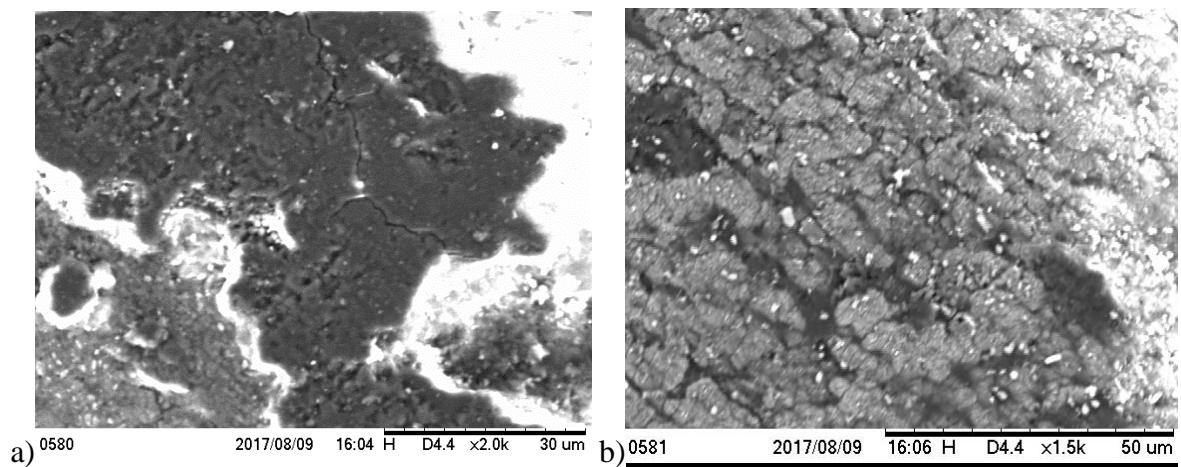
Fonte: Elaboração Própria.

Nas Figuras 101a e b, são apresentadas as superfícies desgastadas do elastômero NBR após ensaio tribológicos. Nota-se nessa superfície uma estrutura simples, é possível visualizar as superfícies desgastadas, a presença de trincas na superfície do material. As trincas tendem a estar posicionadas perpendicularmente à direção de deslizamento, fenômeno também observado por (WANG, 2012 e LIMOL, 2014). A sua origem vem da deformação provocada

pelo esforço cisalhante, mostrando a presença de um desgaste adesivo, provocado pela pressão do contra atrito. Não temos indícios de tribofilme aparente, porém partículas de ferro presente no contra corpo de aço no EDS, conforme mostra a figura 102.

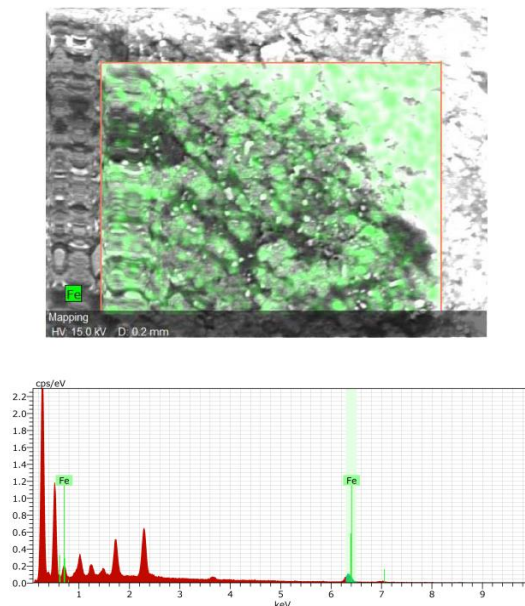
Apesar de dureza inicial bem menor a borracha apresentou mecanismo de desgaste bem distinto da poliamida, sem indícios de conformação plástica e corte devido à característica de ruptura frágil após o limite elástico desta classe de materiais, com maior coeficiente de atrito e menor desgaste. As trincas na superfície são responsáveis pela redução de dureza medida após o desgaste (Figura 91).

Figura 101.: MEV da superfície de atrito após teste do elastômetro NBR.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 102.: EDS evidenciando a superfície do NBR após ensaio tribológico.



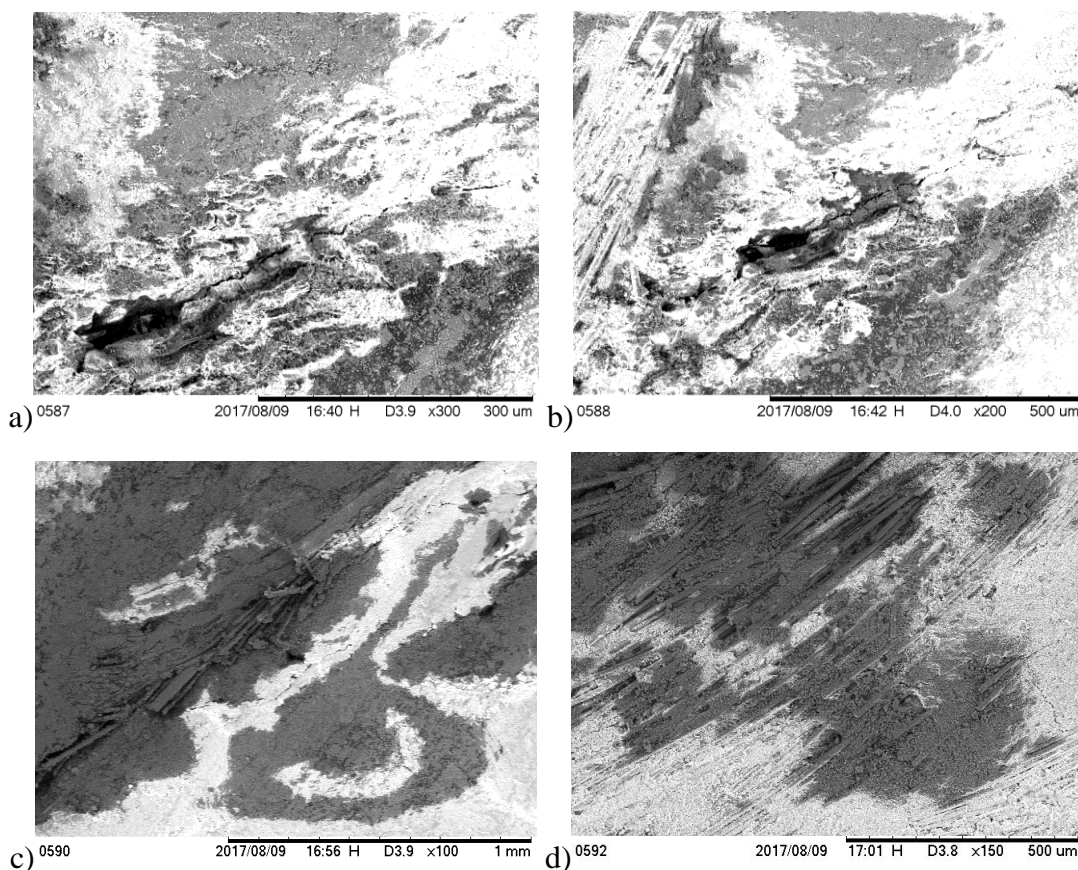
Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 103a, b, c e d é mostrado as superfícies desgastadas da Lona após ensaio tribológicos. Nota-se nessa superfície uma estrutura complexa, onde os elementos, provenientes das diferentes cargas da formulação base, são distribuídos de maneira aleatória e heterogenia, superfície semelhante foi observada por (KUMAR, 2013)

É possível visualizar na figura 103a e b do MEV das superfícies desgastadas a presença de riscos de abrasão provocados pelas grandes quantidades de fibra presente no material. Formando o tribofilme, partículas de desgaste (debris). Observa-se também rachaduras no material. Embora a matriz demonstre comportamento frágil semelhante ao elastômero NBR, as fibras de reforço atuaram eficientemente na contenção do desgaste.

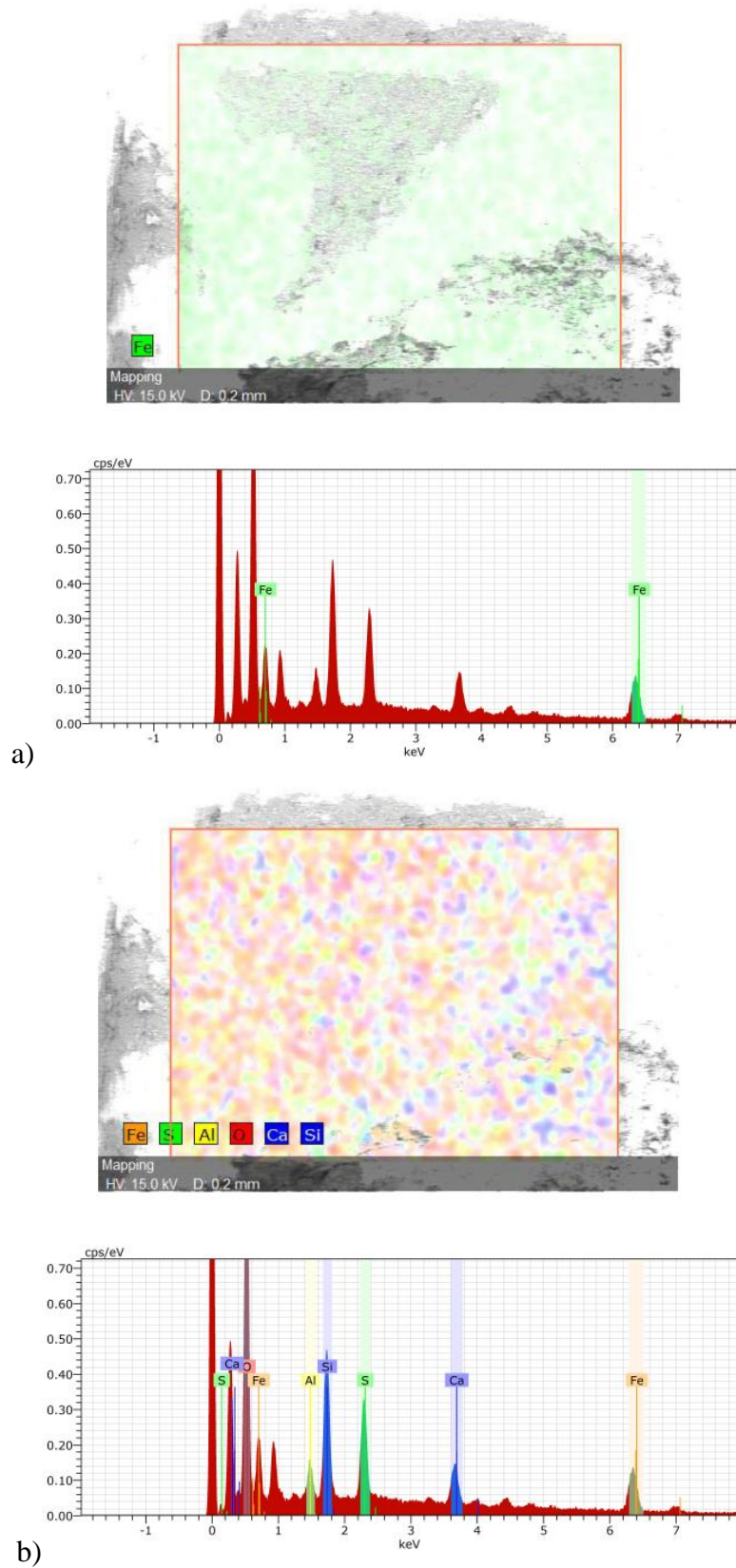
Na análise de EDS da Figura 104a mostra-se uma grande presença de elemento de ferro no tribofilme, observa-se também que a figura 104b os elementos da fibra de vidro, reforço do oxido de alumínio e enxofre pertencente a Lona.

Figura 103.: MEV da superfície de atrito após teste da lona.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 104.: EDS evidenciando a superfície da Lona após ensaio tribológico.a) tribofilme com partícula de ferro; b) partículas contendo elementos da Lona com ferro do conta corpo de aço.



Fonte: Elaboração Própria.

5. Conclusões

Neste trabalho foram caracterizados os materiais utilizados na fabricação de anéis de atrito do amortecedor torcional de discos de embreagem quanto à resistência ao desgaste e atrito. Dos materiais estudados dois dos três materiais são hoje utilizados no mercado como componente de anel de atrito (PA66GF35 e NBR) em motores de quatro cilindros e o terceiro é atualmente utilizado em lonas de embreagem (compósito com matriz NBR).

Os resultados da MO mostraram que o PA66GF35 possui as fibras de vidro curtas direcionadas no sentido do anel e a distribuição das fibras apresentou-se constante. Para o NBR a microscópica óptica evidenciou uma fase bem homogênea do material, com carga mineral distribuída de forma homogênea na microestrutura. O MO da Lona de embreagem observou-se a existência de as fibras unidas em grupos, onde é possível ver um grupo de fibra de vidro ao lado de outro grupo de fibra de aramida, acrílico e fios de cobre, toda essa fibra fica envoltos pela na matriz polimérica, na observação da matriz, notou-se que ela apresenta cargas de óxido e de fibra de vidro picada.

Os resultados de DSC mostraram que o PA66GF35 tem sua temperatura de fusão (T_f) em 240°C , muito maior que os 150°C de temperatura que utilizou para o envelhecimento térmico.

No elastômero NBR, temos uma degradação entre a temperatura de 370°C , temperatura muito acima da temperatura máxima do envelhecimento térmico.

A lona de embreagem observou três picos endotérmicos, sendo que apenas um pico é abaixo da temperatura do envelhecimento na temperatura de 75°C evidencia uma provável cura da resina fenólica junto ao aditivo de proteção superficial conhecido como acetato de polivinila (PVA) presente no compósito. Outros dois picos endotérmicos encontrados são vistos entre a temperatura de 270°C á 330°C , muito acima da maior temperatura de envelhecimento.

Podemos observar que a lona não teve nenhuma variação significativa na sua dureza após o ensaio de envelhecimento. O PA66GF35 para as duas temperaturas ensaiadas teve um aumento de dureza em aproximadamente 4% e 7% nas temperaturas respectivas de 80°C e 150°C , respectivamente assim como uma mudança na coloração para a temperatura mais alta. Para o elastômero NBR não tivemos mudanças significativas para o envelhecimento na temperatura de 80°C , porém para o envelhecimento á 150°C podemos observar que aumentou sua dureza em torno de 32%.

Nos resultados de espectroscopia no infravermelho por ATR do PA66GF35, notou-se a presença de dois picos relacionados diretamente ao estado amorfo ou cristalino do material, obteve-se um aumento da cristalinidade muito maior a 150°C, levando a acreditar que essa alteração foi umas das responsáveis pela alteração na cor e dureza das amostras envelhecidas.

No elastômero NBR evidenciou que as amostras envelhecidas com a maior temperatura obtiveram uma diminuição e até perda dos picos principais do elastômero, caracterizando uma degradação.

Para a lona de embreagem tivemos um resultado diferente das demais amostras avaliadas, os principais espectros evidenciados não apresentaram mudanças significativas, portanto não tivemos uma degradação nítida das lonas avaliadas o envelhecimento térmico.

As condições de ensaio de desgaste procuraram simular as condições mais críticas que pode ser encontrada em motores de 3 cilindros. Durante os ensaios de desgaste a máxima temperatura de trabalho não ultrapassou 80°C, portanto todos os materiais mantiveram estabilidade térmica.

Elastômero NBR e o PA66GF35 apresentaram mecanismos de desgaste bem distintos, o que levou a um comportamento em desgaste e atrito melhor à borracha apesar de dureza inicial muito inferior ao da poliamida reforçada por fibra de vidro.

Nos resultados de dureza Shore D antes e após ensaio tribológicos tivemos um resultado estável para a Lona, mostrando que o mesmo não perdeu propriedade mecânica, diferente o elastômero NBR apresentou mudança em suas propriedades e queda da dureza, porém a PA66GF35 com fibra de vidro mostrou-se com grande mudança na propriedade mecânica, já que sua dureza após teste ficou com metade do valor comparado ao anel virgem. Esse efeito, no entanto, pode estar associado a mudanças na absorção de umidade do material, não necessariamente associada ao processo de desgaste.

Nos resultados de desgaste estes dois materiais fraturaram entre 2 milhões de ciclos. O ensaio de controle após um milhão de ciclos revelou a seguinte seqüência de resistência ao desgaste: PA66GF35 < NBR < lona.

Os resultados das análises de MEV e EDS apresentou tribofilme para o PA66GF35 e a Lona, o PA66GF35 teve uma queda na dureza após o teste e mostrou elementos de degradação em sua superfície através do MEV e EDS, justificando sua possível quebra durante o teste. Outro fator importante é o fato de a temperatura de trabalho coincidir coma a temperatura de transição vítrea deste material. Já a lona de embreagem e o elastômero NBR apresentaram uma quantidade grande de elemento de ferro pertencente ao contra corpo de

aço, no elastômero NBR observou muitas trincas na sua superfície de contato, possível motivo da perda de dureza.

Dentre esses ensaios, apenas a lona de embreagem conseguiu terminar o teste de cinco milhões de ciclos, portanto mesmo tendo o menor coeficiente de atrito, é esse o material mais indicado para a utilização na função de material de sacrifício no amortecedor torcional de discos de embreagem.

Referências Bibliográficas

ARCHARD, J. F. “Contact rubbing of flat surfaces.” Journal of applied physics. Vol. 24 No.1. p. 18-28. 1981.

ASTM G40: Standard terminology relating to wear and erosion. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken: ASTM, 2005. vol. 03.02.

BASF: Ultramid® (PA) Product Brochure, p 65. Disponível em: <<https://goo.gl/M3j9Ny>>. Acesso em: 30 set. 2017.

BAYER, A. G.; KEMPERMANN, T.; KOCH, S.; SUMMER, J. Rubber business group. Germany, 1993, Ed. Bayer publication. p 807.

BEZZAZI, M. et al. Experimental characterization of frictional behavior of clutch facings using pin-on-disk machine. Materials and Design, v. 28. ed. 7. p. 2148 – 2153, 2007.

BHUSHAN B.; GUPTA B. K. “Handbook of Tribology Materials, Coating, and Surface Treatments” New York, 1991, Ed McGraw-Hill Publishing Company. p. 100-110.

BLAU, P. On the nature of running-in, EUA, ed. Tribology international, v. 38, n. 11, p. 1007 – 1012. 2005.

BO, M.; QIHUA, W.; TINGMEI, W.; HONGGANG, W.; LINGQI, J. The friction and wear properties of clay filled PA66, Lanzhou, v. 48, p. 203-209. 2007.

BORGES, S. G. Síntese e caracterização de resinas fenólicas líquidas do tipo novolaca aplicáveis no processo de pultrusão. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. The friction and lubrication of solids, Oxford University Press, April 2001. 424p.

BRAZOLIN, R. T. Desenvolvimento de um modelo de simulação para avaliação da durabilidade de conjuntos de embreagens aplicados em veículos comerciais. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. 2010.

- BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. *Tribology International*, v. 14, n. 4, p. 231-243, 1981.
- BRYDSON, J. A. *Plastic materials an introduction to materials engineering and science*, Londres, Elsevier, 1999.
- BUSSE, L. Reducing friction with Al_2O_3/SiO_2 - nanoparticles in NBR. *Wear, German*. v. 271, p. 1066 – 1071, may 2011.
- CALLISTER JR, W. D.; SOARES, S. M.; MIRANDA, P.E. V. *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais*. Rio de Janeiro, 2006, 2° Ed. LTC.
- CANEVAROLO, S. *Ciências dos Polímeros*. 2006, p. 17 – 224. 2° Ed. Artliber.
- CANEVAROLO, S. *Técnicas de caracterização de polímeros*. 2007, p. 147 – 176 e 427 – 432. 2° Ed. Artliber.
- CHAN, D.; STACHOWIAK, G. W. Review of automotive brake friction materials. *School of Mechanical Engineering, University of Western Australia, Crawley, Australia*, p.953-966, 2004.
- CHEN, Y. K. The effect of different metallic counterface materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and its composite in rolling – sliding contact, *Wear*, n. 255. p. 714 - 721, 2003.
- CONTE, M.; FERNANDEZ B., IGARTUA A. Fritional heating calculations based on tailored experimental tests, 15° NordTrib Conference, Thondheim, 2012.
- CZICHOS, H. Influence of adhesive and abrasive mechanisms on tribological behavior of thermoplastic polymers. *Wear, Amsterdam*, v. 88, n 1, p. 27 – 43, jun 1983.
- CZICHOS, H. “Polymer wear and control”. In: Lee LH, ACS Symp Series, p. 287-293, 1985.
- DIN 50320: Verschleiss Begriffe, Systemanalyse von Verschleissvorgängen, Gliederung des Verschleissgebietes. Berlin, 1979.
- DONG, C. L. et al. Tribological properties of aged nitrile butadiene rubber under dry sliding conditions, *Wear*, v.323, p. 226-237, Jan. 2015.
- DREXL. H. J. *Motor vehicles clutches: Function and design*. Munique: Moderne Industrie, 1998. 70p.

- EVORA, M. C. et al. Comparação de técnicas FTIR de transmissão reflexão e fotoacústica na análise de poliamida-6, reciclada e irradiada. *Polímeros: Ciências e Tecnologia*, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 60 - 68, 2002.
- FAULLANT, P. Particle size effects of tin sulfides in disc brake pads. In: ANNUALBRAKE COLLOQUIUM AND EXPOSITION, 20., 2002, Phoenix. Proceedings Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2002. p. 85-94.
- FERNANDES, G. P. Aplicação da tribologia ao estudo e desenvolvimento de materiais para embreagem automotiva, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- GREGORI, I. R. S.; ZANOTTO, P. S.; HAERTEL TR., W. Definition on the relationship between clutch facing on vehicle and bench testing reliability and DOE (Experimental Design for Experiment), SAE paper 2005-01-1766.
- GOPAL, L. Load, speed and temperature sensitivities of a carbon – fiber-reinforced phenolic friction material. *Wear*, v.181, p. 913 – 921, 1995.
- GUTIÉRREZ, J. C. H; RUBIO, J. C. C; FARIA, P. E. Usinabilidade de materiais compósitos para aplicações automotivas. *Polimeros*, vol. 24, n. 6, p. 711 - 719, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1582>> Acesso em: 02out. 2017.
- HERSKOWICZ, G; PENTEADO P. C; SCOLFARO, VALDEMAR. Curso completo de Física. 1993, p. 632. 1º Ed. Moderna.
- HUANG, X. et al. Friction and wear properties of NBR/PVC composites. Lanzhou, China: ed. Wiley. *Journal of applied polymer science*, v. 106, p2565 - 2570, 2007.
- HUTCHINGS, I.M. Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials. Library Cataloguing in Publication Data, p.217-218. 1992.
- INCA (INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER). Prevenção fatores de risco: amianto. Disponível em: <<https://goo.gl/LCRSaM>>. Acesso em: 15 set. 2017.
- JIA, F; MAO, L. J; MA, Y; YAO, C. Mechanical and thermal properties of dimer acid based nylon 636 / nylon 66 copolymers. *Journal of applied polymer science*, v. 24, p. 654 - 658, 2013.
- JOST, H. P. Tribology micro and Macro Economics: A Road to Economic Savings. *Tribology and Lubrication Technology*, vol. 61, p. 18, 2005.

KUMAR, M; JAYASHREE B. Optimized selection of metallic fillers for best combination of performance properties of friction materials: A comprehensive study. *Wear*, vol. 303, p. 569-583, 2013.

LARANJEIRA, S. M. Estudo do comportamento ao atrito e desgaste de poliamidas. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Aveiro. 2011.

LEWIS, E. E. Introduction to reliability engineering. John & Wiley & Sons, Inc. 435p. 1996.

LIONEL, L. L. Sobre a influência da carga normal e do tamanho da partícula no desgaste abrasivo de materiais elastoméricos empregados na indústria de beneficiamento de minério. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2014.

LIU, J. Investigation of aging behavior and mechanism of nitrile-butadiene rubber (NBR) in the accelerated thermal aging environment. *Polymer testing*, v. 54, p. 59 – 66, 2016.

LIU, X. et al. TA novel in-situ aging evaluation method by FTIR and the application to thermal oxidized nitrile rubber. *Polymer degradation and stability*, v. 128, p. 99 - 106, 2006.

LUDEM, K. C.; TABOR, D. The friction and visco-elastic properties of polymeric solids, *wear* vol. 9, p. 329, 1966

LAUNAY, A. et al. Influence of temperature and relative humidity on the cyclic behavior of a short glass fibre reinforced polyamide, *mechanics of materials*, 2013. Disponível em: <<https://goo.gl/Vd6oqW>>. Acesso em: 02out. 2017.

MA, Y. et al. The effect of formaldehyde/phenol (F/P) molar ratios on function and curing kinetics of high-solid resol phenolic resins. *Journal of applied polymer science*, p. 3096 - 3103, 2013.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a polímeros. 2º Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 185p.

MARK, J. E. Polymer data handbook. New York: Oxford university press, 1999. 1012 p.

MARKOVIC G. et al. Thermal stability of acrylonitrile chlorosulphonated polyethylene rubber blend. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, periodicos, v. 97, n. 3, Jun 2009. P. 999 - 1006. Disponível em: < 10.1007/s10973-009-0162-9.>. Acesso em: 18 sem. 2016.

MEYER, A.L.; et al. – Avaliação das Propriedades Termo-Mecânicos de borracha nitrílica após Ensaio de Compatibilidades de acordo com ASTM D 3455 – Polímero: Ciência e Tecnologia, vol. 16, nº 3, p.230 – 234, ABPol, São Carlos, Brasil – 2006.

NIDHI, J. B. NBR – modified resin in fade and recovery module in non-asbestos organic (NAO) friction materials. *Tribo let.* v. 27. p. 189 – 196, may 2007.

OLIVEIRA, C. D. M. et al. Desgaste de NBR por esferas de aço em ensaios a seco e em regime de lubrificação limítrofe. 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, Brasil. Out, 2007.

PANTELEÓN, E. M.; TANAKA, F. G.; BERNARDES F. G. Analise das variações do coeficiente de atrito e as correlações com os mecanismos de desgaste. *Holos*, 2012, Ed. 28, vol. 1, p 62 – 72.

PATEL, A. K; BAJPAI, R; KELLER, J. M. On the crystallinity of PVA/palm leaf biocomposite using DSC and XRD techniques. *Microsyst technol*, India, v. 20, p. 41 - 49, 2014.

PENEV, T. et al. Assessing frictional properties of rubber floors in free housing systems for dairy cows. *Trakia journal of sciences*, n. 2, Bulgaria. p. 197 – 204. 2013.

PERSON, B. N. J. Sliding friction, *surf. Sci. Reports*, 1999 vol. 33, p. 83-119.

POGACNIK, A; KUPEC, A; KALIN, M. Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*, v. 378, p. 17-26, 2017.

PRITZELWITZ, P. V. Investigação do desgaste de freios e embreagens em prensas mecânicas. Tese de doutorado – Pós-graduação em Engenharia metalúrgica e de materiais. Escola politécnica da universidade de São Paulo para obtenção, São Paulo – S.P., 2010, 119p.

RABINOVICZ, E. The least wear. *Wear*, v. 100, p. 533-541, 1984.

RIBEIRO, L. M.; LADCHUMANANANDASIVAM, R.; GALVÃO, A. O.; BERLAMINO, D. D.; Flamabilidade e retardância de chama do compósito: Poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (PALF), *hollos*, vol. 1, p. 121, 2013.

ROCHA, C. J.; SOARES B. G. Principais copolímeros elastoméricos à base de butadieno utilizados na indústria automobilística, *Sorocaba*, v. 17, n. 4, p. 299 - 307, 2007.

RODRIGUES, A. A. R. Investigação das características tribológicas e ambientais de termoplásticos de engenharia especiais para uso em materiais de atrito, tese de doutorado, Universidade de São Paulo USP, 2007.

ROSA, A. G. A. Compósito de poliamida 6,6 como elemento de atrito. Julho 2012. P.65. Monografia - Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.

ROSA, A. G. A. et al. Study on friction and wear behavior of SAE 1045 steel, reinforced nylon 6.6 and NBR rubber user in clutch disks, *Materials*, v. 17, n. 6, p. 1397 - 1403, Dec 2014.

ROSSINO, L. S. “Estudo do comportamento em fadiga por fretting da liga de Al 7050-t7451”. 2008. P.231. Doutorado em Ciências dos Materiais – Universidade de São Paulo.

SAMUEL, C; RAQUEZ, J. M; DUBOIS, P. PLLA/PMMA blends: A shear-induced miscibility with tunable morphologies and properties. *Polymer*, v. 54, p. 3931 - 3939, 2013.

SENATORE, A.; D’AGOSTINO, V. DI GIUDA, R. PETRONE, V. Experimental investigation and neural network prediction of brakes and clutch material frictional behavior considering the sliding acceleration influence, *tribology*, vol. 44, p. 1204, 2011.

SANTANA, S. J. Avaliação tribológica dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado em contato com aço AISI 52100. 74p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

SILVA, C. H. Degradação do UHMWPE e do POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina. 2003. 262 p. teste (Dourado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, V. L. D. Da; Comportamento mecânico e de flamabilidade de compósito de Polipropileno reciclado com fibra de coco e hidróxido de alumínio. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. 2006.

SOUSA, A. M. F. et al. Resistência ao envelhecimento da borracha nitrílica (NBR): Comparação entre sistemas de cura. 7º Congresso Brasileiro de Polímeros, Brasil. Nov, 2003.

STACHOWIAK, G.W; BATCHELOR, A.W. *Engineering Tribology*. Butterworth – Heinemann, 2ª edition, 2001, 744p

UNAL, H.; MIMAROGLU, A. Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions, *Wear*, v. 286, p. 132 - 137, May 2012.

UNAL, H.; MIMAROGLU, A.; ARDA, T. Friction and wear performance of some thermoplastic polymers and polymer composites against unsaturated polyester, *applied surface science*, v. 252, p.8139 - 8146, Jan 2006.

WIEBECK, H. e HARADA, J. *Plásticos de Engenharia*. 2005, p. 81 – 106 e 197 – 226.

WANG, H. M.; WANG, S. J.; LV, X. R. Effect of swelling nitrile rubber in cyclohexane on its ageing, friction and wear characteristics, *wear* vol. 328, p. 419, 2015.

WANG, L. L.; ZHANG, L. Q.; TIAN, M. Mechanical and tribological properties of acrylonitrile butadiene rubber filled with graphite and carbon black, *Materials and design*, v. 39, p. 450 - 457, Mar 2012.

Wu, Y, et al. FT-IR spectroscopic investigation on the interaction between nylon 66 and lithium salts. *Journal of applied polymer science*, v. 91, p. 2868 – 2875, 2003.

YONG, K. C; SAAD, C. S. M. Novel peroxide-vulcanized NBR-PAni. DBSA blends, part 1: Preparation. *Journal of applied polymer science, China*, v. 112, p. 3199 - 3208, 2008.

YOU LAN, Y. et al. Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of thermoplastic composite materials, China*, v. 29, n. 4, p. 494 - 507, 2016.

ZHANG, S.; CUI, C.; CHEN, G. Tribological behavior of MC nylon 6 composites filled with glass fiber and fly ashz. *Journal of Wuha University of technology Master*, v. 27, n. 2, p. 290 - 295, Apr 2012.