Renato Lucato Gimenez

SÓLIDOS VISCOELÁSTICOS

Área de hemiesferas de borracha contra uma superfície de vidro

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Amilton Sinatora

**São Paulo
2010**

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, familiares e amigos que muito me ajudaram na realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Amilton Sinatora, sempre disposto a ajudar, apoiar e incentivar seus alunos e pela paciência demonstrada durante nosso tempo de convivência. Sem a sua efetiva participação não seria possível a realização deste trabalho.

Aos Professores com os quais me relacionei e aqueles que pude participar de suas aulas, foram muito importantes para a minha formação.

Ao Argemiro Costa e Fernando Cardoso pelo suporte e contribuição na preparação dos materiais para a realização das experiências.

RESUMO

Neste trabalho estudou-se a variação da área de contato de hemiesferas de borracha contra uma superfície plana de vidro, variando-se a força de compressão aplicada, o tempo de aplicação da força e a força de separação das superfícies em contato. Os experimentos foram realizados com quatro borrachas de módulos de elasticidade 16,8, 5,77, 5,42 e 2,64 MPa e durezas de 87, 68, 57 e 44 Shore A, respectivamente. Para borrachas de dureza mais elevada, a variação da área de contato é menor para um mesmo carregamento de referência. Para borrachas com maior módulo viscoso, maior é a variação da área de contato em função do tempo de exposição e maior a força de separação entre as superfícies. Os resultados reafirmam o modelo de Jonhson, Kendall e Roberts para o contato com baixos carregamentos de esferas de borracha e contribui para o entendimento da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento, onde a variação chegou a 23% para a borracha de maior módulo viscoso.

Palavras-chave: Hemiesferas de borracha, área de contato, tempo de exposição e adesão.

ABSTRACT

Contact area variation and separation forces of rubber hemispheres against a flat glass plate were studied with increasing normal forces and load exposure time. The experiments were performed on four different rubbers with Young's modulus of 16.8, 5.77, 5.42 e 2.64 MPa and hardness of 87, 68, 57and 44 Shore A, respectively. For higher hardness rubbers, the contact area variation is smaller for the same load parameters. For higher viscous modulus rubber, the contact area variation over time is higher and it is also higher the surface separation force required. The results found are in agreement with Johnson, Kendall and Roberts model for the contact at low loads of rubber spheres and it does a contribution for the understanding of contact area due to load exposure time where variation reached up to 23% for the higher viscous modulus rubber.

Key words: rubber hemisphere, contact area, exposure time and adhesion.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – A curva A apresenta o comportamento frágil; a curva B de um material elastoplástico é muito similar ao comportamento de muitos metais, que inicia com deformação elástica seguida de deformação plástica; e a curva C é de um material totalmente elástico. (Callister, 2007)</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2 – Curva de tensão-deformação para borracha natural vulcanizada e não vulcanizada à um alongamento de 600%. (Callister, 2007).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3 – Influência da temperatura no poli(metilmetacrilato). (Callister, 2007).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4 – Esquema da variação do módulo de elasticidade de um polímero linear com a variação da temperatura. (Referência não especificada).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5 – Representação gráfica do módulo de elasticidade complexo das borrachas.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6 – Relação entre a área de contato e o carregamento. A curva sólida, para uma área aparente de 10 cm², e a curva pontilhada, para uma área aparente de 1 cm², mostram que a área real de contato é independente da área aparente. (GREENWOOD E WILLIAMSON, 1966)</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7 – Representação esquemática do modelo de Greenwood e Willianson (1966). Superfície rugosa em contato com uma superfície rígida, lisa e plana.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8 - Comparação da área real de contato para (a) metal-metal e (b) plástico-metal. (Adamson, 1967)...</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9 – Quando não há deslizamento, a borracha é capaz de se deformar e acompanhar todo o contorno das rugosidades superficiais. (Persson, 1997).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 10 – (a) Uma superfície lisa de borracha deslizando sobre um substrato duro. (b) Sem deslizamento relativo, a força de adesão é capaz de deformar a borracha a ponto de preencher completamente o perfil do substrato. (Persson, 1999).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 11 – Borracha deslizando sob um substrato duro, na presença de contaminante sólido. (Persson 1997)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12 – Borracha deslizando em substrato duro, na presença de água na superfície. (Persson 1997).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13 – Influência da força normal. Os resultados da variação da energia de separação (γ) em função da velocidade de retirada do carregamento (V) indicam que o aumento da força normal promove aumento na força de adesão. (Roberts e Othman, 1977)</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14 – Resultados do tempo de exposição de borracha natural vulcanizada com enxofre, expressos em função da energia de separação (γ) e da velocidade de retirada do carregamento (V). O nível de energia de separação aumenta com o aumento do tempo de exposição. (Roberts e Othman, 1977).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 15 – A extrapolação da curva de energia de separação (γ) contra o tempo de espera (t), sugere que um tempo mínimo de 0,1 seg deve acontecer para que a adesão seja estabelecida. Experimentos realizados com borracha natural vulcanizada com enxofre. (Roberts e Othman, 1976)</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16 – Adesão entre esferas elásticas e um substrato plano (a) na ausência de adesão e (b) na presença de adesão. (Roberts, 1976).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17 – Contato entre duas superfícies convexas de raios R_1 e R_2 sob carregamento normal de P_0. Onde a_0 é o raio de contato pela teoria de Hertz, a_1 é o raio de contato entre as duas superfícies e δ é o deslocamento elástico. (Johnson, Kendall e Roberts 1971)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 18 – Distribuição de esforços no contato de superfícies esféricas. Quando as superfícies são mantidas em contato com uma área de superfície aumentada por forças superficiais, os esforços são de tração (T) nas</i>	

<i>extremidades do contato e só permanecem compressivos (P) no centro. A distribuição “A” são os esforços por Hertz com $a=a_1$ e $P=P_1$; A distribuição “B” são os esforços reais (Johnson 1958) com $a=a_1$ e $P=P_0$; e a distribuição “C” são os esforços por Hertz com $a=a_0$ e $P=P_0$. (Johnson, Kendall e Roberts 1971).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19 - Resultados para duas esferas de borracha ($R_1 = R_2 = 2,2$ cm) em contato seco e lubrificado. +, contato seco; o, contato com água; x, contato com solução SDS (Dodecil Sulfonato de Sódio); ---, teoria de Hertz; __, teoria modificada por Johnson, Kendall e Roberts (1971).</i>	<i>47</i>
<i>Figura 20 – Resultados para esfera de borracha ($R=2,2$ cm) em contato seco com uma placa lisa de borracha sob carregamentos leves positivos e negativos. O, resultados do contato; ---, teoria de Hertz; __, teoria modificada. (Johnson, Kendall e Roberts 1971)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21 – Contato seco para esferas de gelatina, com diferentes raios de curvatura, pressionadas contra uma superfície plana e lisa de Perspex. O, 2,45 cm de raio; X, 7,9 cm de raio; □, 25,5 cm de raio; ---, teoria de Hertz; —, teoria modificada. (Johnson, Kendall e Roberts 1971).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 22 – Resultado para esferas de gelatina em contato seco com uma superfície plana e lisa de Perspex sob pequenos carregamentos positivos e negativos, demonstrados no gráfico sem escala dimensional. O, 2,45 cm de raio; X, 7,9 cm de raio; □, 25,5 cm de raio; ---, teoria de Hertz; —, teoria modificada. (Johnson, Kendall e Roberts 1971).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 23 – Equipamento NIKON utilizado para registrar a área de contato das esferas de borracha com a superfície de vidro.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 24 – Variação do diâmetro médio de contato em função do carregamento aplicado, com a representação dos respectivos intervalos de confiança 95%.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25 – Variação da área de contato em função do carregamento aplicado, com a representação dos respectivos intervalos de confiança 95%.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 26 – Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera A 1 (enchimento).63</i>	
<i>Figura 27 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera A 2 (enchimento). 64</i>	
<i>Figura 28 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera B 1 (rodagem). 64</i>	
<i>Figura 29 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera B 2 (rodagem). 65</i>	
<i>Figura 30 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera C 1 (lateral). 65</i>	
<i>Figura 31 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera C 2 (lateral). 66</i>	
<i>Figura 32 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera D 1 (estanque). ... 66</i>	
<i>Figura 33 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera D 2 (estanque). ... 67</i>	
<i>Figura 34 – Diâmetro de contato das hemiesferas A em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 35 – Diâmetro de contato das hemiesferas B em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).</i>	<i>69</i>
<i>Figura 36 – Diâmetro de contato das hemiesferas C em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).</i>	<i>69</i>
<i>Figura 37 – Diâmetro de contato das hemiesferas D em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).</i>	<i>70</i>
<i>Figura 38 – Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera A. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.</i>	<i>76</i>

<i>Figura 39 – Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera B. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 40 – Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera C. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 41 - Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera D. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 42 - Variação do diâmetro de contato das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro em função do tempo de exposição ao carregamento.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 43 - Variação da área de contato das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro em função do tempo de exposição ao carregamento.</i>	<i>78</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Materiais (hemiesferas e chapa de vidro) utilizados para a medição da área de contato.</i>	56
<i>Tabela 2 – Composição das hemiesferas utilizadas neste trabalho.</i>	57
<i>Tabela 3 – Diâmetros da área de contato das hemiesferas A1 e A2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.</i>	59
<i>Tabela 4 – Diâmetros da área de contato das hemiesferas B1 e B2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.</i>	60
<i>Tabela 5 – Diâmetros da área de contato das hemiesferas C1 e C2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.</i>	60
<i>Tabela 6 – Diâmetros da área de contato das hemiesferas D1 e D2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.</i>	61
<i>Tabela 7 – Diâmetro médio de contato entre as hemiesferas de borracha (A, B, C, D) contra uma superfície de vidro e cálculo dos diâmetros de contato utilizando as formulações de Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).</i>	68
<i>Tabela 8 – Força de separação das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro.</i>	71
<i>Tabela 9 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera A em função do tempo de exposição.</i>	74
<i>Tabela 10 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera B em função do tempo de exposição.</i>	74
<i>Tabela 11 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera C em função do tempo de exposição.</i>	75
<i>Tabela 12 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera D em função do tempo de exposição.</i>	75
<i>Tabela 13 – Variação da área de contato do momento de aplicação de carga até o equilíbrio da área de contato.</i>	79
<i>Tabela 14 – Variação da área de contato no descarregamento. A área inicial é a medição no momento de retirada da carga e a área final é o valor após atingido o equilíbrio.</i>	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a, a_0, a_1 – Raio de contato

d – separação entre os corpos

E, E_1, E_2 – Módulo de elasticidade

E^* - Módulo de elasticidade complexo

E' – Módulo de elasticidade elástico

E'' – Módulo de elasticidade viscoso

E_r – Módulo de relaxação

F – Força horizontal

F_{at} – Força de atrito

F_{adh} – Força de adesão

F_s – Força de superfície

h – Altura

H – Dureza de indentação

K – Constante elástica

l - comprimento

p – Distribuição de pressão

P – Esforços de compressão

P_0 – carregamento de Hertz para a área de contato, não considerando as forças de superfície

P_1 – carregamento de Hertz para área de contato, considerando as forças de superfície

R, R_1, R_2 – Raio das esferas

R_a – Rugosidade média

R_{max} – Rugosidade máxima

T – Temperatura

$\tan \delta$ – razão entre o módulo viscoso e o módulo elástico do material

T_g – Temperatura de transição vítrea

T_m – Temperatura de ebulição

T_r – Esforços de tração

V - velocidade

w – Força normal aplicada

z_1 – Altura das asperezas em relação à linha de referência

Letras gregas:

β – Densidade de asperezas por unidade de área

δ – Deslocamento elástico

ϵ_0 – Nível de deformação

λ – Comprimento de onda

$\gamma, \gamma_r, \gamma_g, \gamma_{rg}$ – Energia livre de superfície

μ - Coeficiente de atrito

μ_s – Coeficiente de atrito estático

μ_d – Coeficiente de atrito dinâmico

ν - Constante de Poisson

σ_s – Desvio padrão da distribuição de alturas das asperezas

$\sigma(t)$ – Tensão dependente do tempo

Ψ – Índice de plasticidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO	13
1.2	INTERESSE DA INDÚSTRIA	13
1.3	IMPORTÂNCIA ACADÊMICA.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	ELASTÔMEROS	15
2.1.1	Histórico.....	16
2.1.2	Principais Elastômeros.....	19
2.1.3	Propriedades Físico-Mecânicas.....	20
2.2	ÁREA DE CONTATO	26
2.2.1	Área aparente de contato	27
2.2.2	Área real de contato.....	27
2.2.3	Importância da área de contato	28
2.2.4	Fatores que afetam a área real de contato.....	29
2.3	MODELOS PARA ESTIMATIVA DA ÁREA REAL DE CONTATO	39
2.3.1	Estimativa da área real de contato sem adesão	40
2.3.2	Estimativa da área real de contato com adesão.....	41
2.4	COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	52
3.1.1	Aplicação de massa	52
3.1.2	Força de adesão	53
3.1.3	Efeito do tempo de contato	54
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	55
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS.....	56
3.4	LIMPEZA DAS HEMIESFERAS E CHAPA DE VIDRO	57
3.4.1	Resultado da limpeza.....	58
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES	59
4.1	EFEITO DA MASSA APLICADA NA ÁREA DE CONTATO.....	59
4.1.1	Discussão dos resultados frente aos modelos de Hertz e Johnson, Kendall e Roberts.....	67
4.2	ADESÃO.....	71

4.2.1	Força de separação.....	71
4.3	EFEITO DO TEMPO NA ÁREA DE CONTATO	73
5	CONCLUSÕES.....	82
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
ANEXO 1.....		84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		87

1 INTRODUÇÃO

Os elastômeros apresentam algumas características únicas, como por exemplo, altíssima deformação elástica, algumas vezes chegando a 1000%, baixo módulo de elasticidade em comparação com outras famílias de materiais e comportamentos viscoelásticos, que faz com que sejam muito utilizados em algumas aplicações, como por exemplo: pneus para bicicletas, veículos automotores, vedações, tubulações flexíveis, entre outros. Além de atingir altos desempenhos em aplicações específicas, os elastômeros permitem reduções de massa e de custo para os usuários se comparados com outras opções de materiais.

A associação entre elevadas deformações elásticas, baixo módulo de elasticidade e comportamento viscoelástico, em certas condições de carregamento, faz com que a área de contato dos elastômeros com outros materiais seja dependente da adesão entre os corpos e do tempo de aplicação das forças. Esta relação de dependência motivou este trabalho.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é estudar a área de contato de um dos elastômeros mais conhecidos, a borracha, mediante a compressão de hemiesferas de borracha contra uma superfície plana de vidro. As variáveis estudadas serão as forças aplicadas, o tempo de aplicação das forças e o tipo de borracha. A variação do tipo de borracha será associada a níveis diferentes de adesão entre borracha e vidro.

1.2 INTERESSE DA INDÚSTRIA

A área de contato dos pneus de um automóvel com o pavimento (asfalto, concreto, etc.) é o único meio de transmissão de esforços (aceleração frontal e lateral, frenagem, etc.) e responsável por manter a segurança, estabilidade e conforto dos passageiros do veículo. Em vedações a área de contato entre as

superfícies é responsável por manter a estanqueidade do sistema. Estes dois exemplos mostram a importância tecnológica do tema deste estudo o que poderá permitir melhorias nas propriedades e desempenho destes componentes.

1.3 IMPORTÂNCIA ACADÊMICA

Conhecer os mecanismos pelos quais se estabelece a área de contato entre sólidos e em particular entre um sólido viscoelástico e um outro sólido é importante para o modelamento e a previsão das áreas de contato entre sólidos. Em decorrência disso, obter dados experimentais que permitam quantificar os fatores que afetam os mecanismos, é justificável do ponto de vista acadêmico.

Adicionalmente, identificar a ocorrência e a intensidade do fenômeno de adesão na formação da área de contato pode contribuir para melhor entendimento do fenômeno de atrito uma vez que, em muitas circunstâncias, o fenômeno de adesão contribui expressivamente para o valor do coeficiente de atrito.

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos elastômeros e revisa-se o histórico do estudo da área de contato entre estes materiais e outros sólidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Desenvolve-se a revisão em duas partes: inicia-se com um texto sobre elastômeros, para apresentar os aspectos relevantes destes materiais para a dissertação e em seguida procede-se com uma revisão sobre área de contato.

2.1 ELASTÔMEROS

Popularmente o termo “borracha” tinha inicialmente por significado, somente borracha natural e o termo “vulcanização” somente reticulação com enxofre. Face ao aparecimento de muitas borrachas sintéticas e de novos sistemas de reticulação (como peróxido de hidrogênio, dissulfeto de carbono, etc), o alcance daqueles termos foi alargado, tornando-se mais genérico, o que requer que sejam estabelecidas algumas definições.

Segundo a Norma ISO 1382:2008 – “*Rubber Vocabulary*”, define-se:

Elastômero - Material macromolecular que recupera rapidamente a sua forma e dimensões aproximadas iniciais, após uma deformação substancial causada por uma tensão e subsequente retirada da mesma.

Borracha – a borracha pode ter 3 definições diferentes dependendo do contexto. Pode ser como produto final, matéria prima ou material intermediário para fabricação de um produto.

- Produto: borracha é uma família de materiais poliméricos que são flexíveis e elásticos.
- Matéria prima: borracha é um polímero elástico natural ou sintético (elastômero) que forma a base do composto usado em muitos produtos de borracha.

- Material intermediário para fabricação de um produto: borracha é sinônimo de composto. Composto é o termo preferencial a ser utilizado no caso de material intermediário.

Por sua vez, segundo a norma DIN 53501, os termos elastômero e borracha são definidos de acordo com critérios baseados no produto final da seguinte forma:

Elastômeros - os elastômeros são materiais poliméricos reticulados (vulcanizados) até sua temperatura de decomposição, são duros como vidro no caso de temperaturas abaixo de -50°C , e não somente apresentam fluxo viscoso no caso de altas temperaturas (de acordo com sua composição, entre 100 e 250°C), mas também se comportam elasticamente como borracha até sua temperatura de decomposição, especialmente a temperaturas ambientes.

Borracha (matéria-prima) – as borrachas são polímeros não reticulados, mas reticuláveis (vulcanizáveis) e que são elásticos à temperatura ambiente e, dentro de certos limites, em gamas adjacentes de temperatura. Em temperaturas elevadas e/ou sob a influência de forças de deformação, a borracha mostra, de modo crescente, um fluxo viscoso que a torna capaz, sob condições adequadas, de sofrer processos de modelação. A borracha é o material de partida para a manufatura de elastômeros.

Os materiais estudados neste texto serão tratados como elastômeros e seu desenvolvimento ao longo do tempo é apresentado a seguir.

2.1.1 Histórico

O histórico abaixo foi sintetizado e adaptado de Ciullo e Hewitt (1999).

Os exploradores europeus, na América Central e América do Sul, viram os nativos explorando e utilizando as propriedades elásticas e resistência à água de látex seco proveniente de determinadas árvores. Os povos indígenas já sabiam como fabricar, de forma artesanal, tecidos e botas a prova de água, cobrindo estas peças com látex e depois as secando. Os indígenas também enrolavam o látex para

fabricação de bolas. O látex seco chamou muita atenção da comunidade europeia da época, principalmente cientistas. O látex recebeu o nome de borracha em 1770 quando John Priestly descobriu que este poderia apagar as marcas de lápis. [*It received the name “rubber” in 1770 when John Priestly discovered that it could rub out pencil marks.*] (Rubber Formulary, 1999)

No começo do século XIX, borracha foi reconhecida como um material flexível, forte (difícil de quebrar), a prova de água e impermeável ao ar. No entanto sua exploração comercial foi restrita devido ao seu difícil processamento. Mais importante que isso, artigos feitos de borracha tornavam-se rígidos e duros em climas frios e moles e pegajosos em climas quentes. A longa procura por fazer artefatos de borracha que fossem úteis, levou Thomas Hancock da Grã Bretanha a inventar a manta de borracha e, em 1820, uma máquina para processar borracha. O “mastigador” inventado por ele, sujeitava a borracha a intenso cisalhamento que fazia com que a borracha ficasse macia o suficiente para ser misturada e conformada. Esse desenvolvimento foi seguido, em 1839, pela descoberta da vulcanização, que é creditada a dois pesquisadores: Hancock e Charles Goodyear dos Estados Unidos.

A fonte do látex naquela época foi a árvore *Havea Brasiliensis*, que é nativa do vale Amazônico. O Brasil se tornou o principal fornecedor de borracha, mas com o crescimento do uso de borracha algumas questões surgiram quanto à capacidade do país de assegurar o fornecimento a partir dessas árvores selvagens. Em 1876, Henry Wickham coletou 70.000 sementes de *Havea* no Brasil e enviou a Kew Gardens em Londres para germinação. Poucas sementes germinaram, mas as que conseguiram firmar-se permitiram os Ingleses a estabelecer uma plantação na região Este do país.

A patente de Dunlop para pneus pneumáticos na Inglaterra em 1888 surgiu na era das bicicletas como um precursor para a era dos automóveis. Pneus necessitam de borracha e a demanda cresceu tanto no início do século XX que todas as fontes de borracha natural na América e África chegaram a seu limite. Essa demanda e os altos preços causados por ela, fizeram a plantação migrar para outras áreas, tais como: Ceilão (Sri Lanka), Malaia (Malásia), Singapura e o Este Indiano (Indonésia).

Em 1914, a extração de borracha natural de árvores plantadas já havia superado a exploração de árvores naturais e em 1920 essas plantações já representavam 90% das explorações para fornecimento de borracha natural.

A disponibilidade de plantações de alta qualidade de borracha natural facilitou os avanços nos métodos de produção e a melhoria na qualidade dos produtos. A demanda de borracha também gerou o início nas pesquisas de substitutos para este material. No começo de 1880 os químicos orgânicos identificaram isopreno como a principal estrutura unitária da borracha. Em 1890, muitos pesquisadores fizeram a síntese de poli-isopreno. Porém, com a disponibilidade de borracha natural, alternativas sintéticas permaneceram principalmente no interesse acadêmico. Durante a primeira Guerra Mundial, foi produzida grande quantidade de borracha sintética, porém a produção foi abandonada depois da guerra devido às propriedades inferiores desse material.

Após a primeira Guerra Mundial, os governos da Alemanha e Rússia, países militares mais susceptíveis a perdas de fornecimento de borracha natural, iniciaram programas de desenvolvimento de alternativas sintéticas. Essa iniciativa ganhou força na década de 1920 quando os preços da borracha subiram novamente devido a restrições na produção da Inglaterra.

Quando a segunda Guerra Mundial iniciou em 1939, tanto a Alemanha quanto a Rússia podiam suprir satisfatoriamente suas necessidade de borracha com alternativas sintéticas. Quando a guerra se espalhou por todo o Este Europeu, o governo dos Estados Unidos chegou à conclusão que o fornecimento de borracha natural estava em risco. Em 1940, o governo dos EUA estabeleceu uma organização governamental chamada "*Rubber Reserve Company*". Essa organização tinha a responsabilidade de manter reservas de borracha natural em estado de pronta entrega e iniciar pesquisas de borracha sintética e um programa de desenvolvimento desse material. Baseado na tecnologia desenvolvida na Alemanha e Rússia antes da guerra, polímeros de estireno-butadieno tornaram-se foco no desenvolvimento como a principal alternativa para a borracha natural.

A segunda Guerra Mundial representou a adolescência acelerada da indústria da borracha, a preparação para sua maturação no pós-guerra e crescimento. O desenvolvimento na química orgânica e polimérica gerou o entendimento das propriedades da borracha natural, que levou ao desenvolvimento das borrachas: neoprene, estireno-butadieno, nitrílica e butílica. Essas borrachas tornaram-se viáveis para produção e comercialmente significantes após o desenvolvimento de compostos de borracha. O valor do negro de fumo como reforço na borracha para melhoria de suas propriedades mecânicas foi descoberto pela empresa “*Diamond Rubber*” em 1912. No final da segunda Guerra Mundial, a arte e a ciência da formulação de compostos tinham feito a conexão entre os elastômeros e produtos de borracha.

2.1.2 Principais Elastômeros

Os elastômeros são de vários tipos e os mais comuns são:

Uma explicação detalhada dos principais elastômeros pode ser encontrada em “The Rubber Formulary” (Ciullo e Hewitt, 1999).

2.1.3 Propriedades Físico-Mecânicas

As propriedades dos elastômeros serão divididas em propriedades instantâneas, aquelas que variam pouco em relação ao tempo de aplicação do esforço, e propriedades dependentes do tempo. A seguir apresenta-se uma visão elementar dessas propriedades, suficiente porém, para a análise dos resultados.

2.1.3.1 Comportamento Tensão-deformação - propriedades instantâneas

Existem 3 curvas de tensão-deformação características dos polímeros que são ilustradas na Figura 1 a seguir. O comportamento apresentado pela curva C é característica dos polímeros que exibem a elasticidade como as da borracha, essa classe de polímeros é chamada de elastômeros. Os elastômeros apresentam características de deformação elástica muito alta, enquanto seu módulo de elasticidade é muito baixo. A deformação elástica da borracha pode chegar a 1000% enquanto que na maioria dos materiais poliméricos é ao redor de 1% e para metais em geral é bem menor que 1%.

Figura 1 – A curva A apresenta o comportamento frágil; a curva B de um material elastoplástico é muito similar ao comportamento de muitos metais, que inicia com deformação elástica seguida de deformação plástica; e a curva C é de um material totalmente elástico. (Callister, 2007)

Para alterar e controlar o comportamento mecânico dos elastômeros utiliza-se o processo de vulcanização. A vulcanização, também conhecida como “cura”, é o processo químico de formação de ligações cruzadas entre as moléculas do elastômero. As principais propriedades que podem ser alteradas com a vulcanização são: aumento do módulo de elasticidade, diminuição da viscosidade, aumento da dureza, diminuição da solubilidade e aumento da resistência à abrasão.

A Figura 2 mostra a variação da curva tensão-deformação devido ao processo de vulcanização. A resistência mecânica de um elastômero vulcanizado é bem maior que a de um elastômero não vulcanizado.

Figura 2 – Curva de tensão-deformação para borracha natural vulcanizada e não vulcanizada à um alongamento de 600%. (Callister, 2007)

2.1.3.2 Comportamento Tensão-deformação - dependência da temperatura

Os polímeros elastoméricos também são muito susceptíveis ao efeito da temperatura, como pode ser observado nas curvas tensão-deformação da Figura 3. O efeito da temperatura é mais evidente durante a deformação e à temperaturas próximas à ambiente.

Figura 3 – Influência da temperatura no poli(metilmetacrilato). (Callister, 2007)

Verifica-se que tanto a tensão máxima quanto o módulo, variam com a alteração da temperatura. A variação do módulo com a redução da temperatura resulta em campos de comportamento mecânico muito diferentes, separados pela temperatura de transição vítrea, T_g . Esta temperatura demarca a redução significativa do movimento de grandes cadeias moleculares e é onde o comportamento do polímero muda de comportamento borrachoso para comportamento rígido ou vítreo. A temperatura de transição vítrea da borracha natural está na ordem de -60°C , e para a maioria dos compostos de borracha é dessa mesma ordem.

A Figura 4 a seguir ilustra a variação do módulo de elasticidade em função da temperatura.

Figura 4 – Esquema da variação do módulo de elasticidade de um polímero linear com a variação da temperatura. (Referência não especificada)

A temperatura de transição vítrea depende das características moleculares que afetam a rigidez das cadeias. A flexibilidade das cadeias diminui e a T_g aumenta na presença dos seguintes componentes: grupos laterais/ramificações (como benzeno), grupos polares, ligações duplas e grupos aromáticos. (Callister, 2007)

2.1.3.3 Viscoelasticidade e Módulo

A resistência à tração e o módulo de elasticidade dos elastômeros dependem do tempo. Este comportamento é chamado genericamente de comportamento viscoelástico. Segundo a norma ISO 1382:2008, viscoelasticidade é a combinação da resposta à deformação de um material, com a contribuição relativa do tempo, da temperatura, tensão e deformação do material. O ASM Handbook e a norma ASTM D 1566:2009 acrescentam que a deformação seja dependente da taxa de deformação. Ou seja, o valor da tensão aplicada, o tempo e a taxa de aplicação desta tensão, bem como a temperatura e o módulo de elasticidade, afetam o valor final da tensão obtida.

Em decorrência existe uma resposta instantânea à deformação, o módulo elástico ou o módulo real, e uma resposta que depende do tempo, o módulo viscoso ou módulo de relaxação.

Esses módulos podem ser medidos experimentalmente. Um dos métodos para medição é a relaxação à tensão. Nesse método, o corpo de provas é alongado rapidamente em tensão a uma deformação predeterminada e relativamente baixa. A temperatura é mantida constante. É possível observar que a tensão necessária para manter a deformação inicialmente imposta cai em função do tempo, esse resultado é devido ao processo de relaxação das cadeias moleculares que acontece nos polímeros. (Callister, 2007)

Pode ser definido Módulo de Relaxação, $E_r(t)$, o módulo elástico dependente do tempo para polímeros viscoelásticos. (Callister, 2007)

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_o}$$

Equação 1

Onde $\sigma(t)$ é a tensão dependente do tempo e ϵ_o é o nível de deformação mantido constante. O módulo de relaxação caracteriza o comportamento viscoelástico dos polímeros. Como o módulo de relaxação é função da temperatura, para obter uma melhor caracterização da relaxação nos materiais poliméricos, pode-se fazer a medição em gamas variadas de temperaturas.

A razão entre o módulo viscoso (também designado por módulo de perda) e o módulo elástico (também designado por módulo de armazenagem) em uma dada deformação, designa-se “*tan delta*” ($\tan \delta$), onde $\tan \delta$ é a tangente do ângulo de perda (δ). A Figura 5 a seguir ilustra esse conceito.

Figura 5 – Representação gráfica do módulo de elasticidade complexo das borrachas

$$E^* = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}$$

Equação 2

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

Equação 3

2.1.3.4 Dureza

Segundo ASM Handbook (2000), dureza é uma medida de resistência do material à indentação da superfície e abrasão; pode ser interpretado como uma função da tensão necessária para produzir alguma deformação específica na superfície do material.

A medição de dureza em elastômeros consiste em medir a profundidade de impressão deixada no material com a aplicação de carga e é dependente das propriedades viscoelásticas do material e do tempo de duração da medição. A escala Shore de dureza é utilizada para a medição em polímeros, elastômeros e borrachas.

2.2 ÁREA DE CONTATO

Os fenômenos decorrentes da interação entre as superfícies de dois corpos em contato influenciam diretamente a resposta do sistema. Nos casos em que a interação entre corpos se dá pela área de contato, esta deve ser largamente estudada para conhecer a resposta do sistema. A área real de contato pode ser bastante diferente da área aparente de contato e variar muito de acordo com a influência de fatores como carga aplicada, tempo de contato entre as superfícies, forças de adesão, entre outros.

Neste item será detalhada a diferença entre área aparente de contato e área real de contato, bem como os principais fatores que influenciam a variação da área real de contato na interação das superfícies de contato.

2.2.1 Área aparente de contato

Área aparente de contato, em tribologia, é a área de contato entre duas superfícies sólidas definidas pelo limite macroscópico de suas interfaces (ASM Handbook, 1992). Por exemplo, se tivermos um cubo de lado 10 mm em contato com uma superfície lisa e rígida de maior dimensão, a área aparente de contato é definida pela área da face do cubo, ou seja, 100 mm².

A área aparente de contato, muitas vezes, não reflete a área que efetivamente está em contato com outros materiais. Para materiais metálicos, para os quais o módulo de elasticidade é elevado em comparação com materiais elastoméricos e que não tenham comportamento viscoelástico, a área real de contato pode ser muito diferente da área aparente de contato.

Para materiais elastoméricos, principalmente borrachas, a área real de contato aproxima-se muito da área aparente de contato entre as superfícies. Isso é devido às propriedades dos materiais elastoméricos, tais quais, baixo módulo de elasticidade, comportamento viscoelástico e maior energia livre de superfície se comparado com materiais policristalinos.

2.2.2 Área real de contato

Área real de contato, em tribologia, é a soma das áreas locais de contato entre duas superfícies sólidas, formadas pelo contato das asperezas, que transmitem a força interfacial entre as duas superfícies (ASM Handbook, 1992). A área real de contato é a área na qual um material efetivamente entra em contato com o outro material com o qual faz interface.

No caso da aplicação de uma força externa, a interação das superfícies ocorre no contato de suas asperezas, as quais se deformam elásticamente e plasticamente permitindo que outras asperezas também entrem em contato com o material até o ponto onde a superfície real de contato seja suficiente para suportar o carregamento imposto ao sistema.

Para materiais como o aço, a área aparente de contato é muito superior à área real de contato e esta é, muitas vezes, determinada apenas pelo carregamento normal, mesmo que os corpos em comparação possuam áreas aparentes de contato muito diferentes.

2.2.3 Importância da área de contato

A área de contato é de importância fundamental no que diz respeito à transmissão de esforços, calor e corrente elétrica. A seguir há uma breve descrição da importância da área de contato para os 3 fatores citados acima.

2.2.3.1 Transmissão de esforços

Considerando um automóvel, o único ponto de ligação entre o veículo e o solo é a área de contato entre o pneu e o pavimento. Sendo assim, todos os esforços gerados pelo veículo serão transmitidos à área de contato que terá que suportar e responder a esses estímulos de forma a manter a segurança dos passageiros. Durante uma frenagem, por exemplo, toda a quantidade de movimento gerada pela massa e velocidade do veículo, terá que ser suportada pela área de contato entre pneu e pavimento; caso essa área não suporte os esforços, a segurança dos passageiros estará comprometida.

Se for considerada uma vedação, a região responsável por manter a estanqueidade do conjunto é a área de contato entre selo de vedação e um corpo rígido. Caso o selo de vedação (por exemplo: *O-ring*) não receba esforço suficiente para manter a área de contato quando submetido a uma pressão externa, não haverá área de contato suficiente para manter a vedação do sistema.

2.2.3.2 Transmissão de calor

Na vulcanização de um pneu, a transmissão de calor é realizada entre um *bladder* de borracha e o pneu em si. Para que haja a vulcanização uniforme e

completa do pneu, o contato entre o *bladder* e o pneu deve ser estabelecido de forma que toda a superfície do pneu esteja em contato com o *bladder*. Caso isso não ocorra, o pneu possuirá áreas onde a vulcanização pode ser incompleta e gerar problemas de desempenho no produto.

2.2.3.3 Transmissão de corrente elétrica

Considerando uma tomada para ligar qualquer equipamento elétrico, a transmissão de energia elétrica para o aparelho será realizada pela área de contato entre os pinos desta tomada. Caso a área de contato seja pequena, haverá uma grande quantidade de energia passando por poucos pontos, aumentando a resistência elétrica desse conjunto, que faz com que a tomada superaqueça.

2.2.4 Fatores que afetam a área real de contato

Os principais fatores que influenciam a área real de contato são mostrados a seguir, levando em consideração as características de sólidos elásticos e viscoelásticos.

2.2.4.1 Fatores que afetam a área real de contato nos sólidos elásticos

Nos sólidos elásticos o fator principal que afeta a área real de contato entre superfícies é a rugosidade superficial e o modelo prevalecente é o de Greenwood e Williamson (1966). A Figura 6 a seguir mostra que a área real de contato varia linearmente em função do carregamento aplicado e a resposta do sistema independe da área aparente de contato. A resposta desse sistema é característica de materiais metálicos, pois para materiais elastoméricos a resposta do sistema nem sempre é linear em função do carregamento, principalmente para baixos carregamentos (Johnson, Kendall e Roberts, 1971).

Figura 6 – Relação entre a área de contato e o carregamento. A curva sólida, para uma área aparente de 10 cm², e a curva pontilhada, para uma área aparente de 1 cm², mostram que a área real de contato é independente da área aparente. (GREENWOOD E WILLIAMSON, 1966)

O modelo mais utilizado de contato entre superfícies rugosas foi apresentado por Greenwood e Williamson (1966), que admite que a superfície rugosa tenha picos com formato esférico de raios variados e se distribuem uniformemente sobre a superfície (com determinada densidade por unidade de área). A outra superfície é admitida ser rígida, lisa e plana. Os picos da superfície rugosa têm altura aleatória e se deformarão elasticamente quando carregados. A Figura 7 a seguir mostra o contato de uma superfície rugosa com um plano liso, segundo o modelo de Greenwood e Williamson (1966).

Figura 7 – Representação esquemática do modelo de Greenwood e Williamson (1966). Superfície rugosa em contato com uma superfície rígida, lisa e plana.

Neste modelo, a distribuição das alturas das asperezas segue uma distribuição estatística que pode ser descrita em função da densidade de probabilidade (as formulações estatísticas não são descritas nessa dissertação). No caso da Figura 6 assumiu-se que a distribuição das alturas das asperezas mais altas obedecia a uma distribuição exponencial. Portanto, para os contatos no campo elástico, o número de contatos, a área de contato e a carga de contato dependerão da distribuição adotada; se a distribuição for exponencial, o número de contatos e a área real de contato são linearmente proporcionais à carga total aplicada. Embora a distribuição exponencial descreva muito bem a distribuição de alturas das asperezas, em muitas superfícies reais foi verificado que a distribuição Gaussiana descreve melhor essa distribuição (Whitehouse 1994).

Caso o contato seja no regime plástico, a pressão de contato é constante e já atingiu seu máximo, neste caso a área real de contato também é diretamente proporcional ao carregamento aplicado. Greenwood e Williamson (1966) definiram um índice de plasticidade para quantificar a fração das áreas reais que estava no regime elástico ou plástico, da seguinte forma:

$$\psi = \frac{E'}{H} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_s}{\beta}}$$

Equação 4

Onde, H é a dureza de indentação da superfície rugosa e σ_s é o desvio padrão da distribuição de alturas das asperezas.

O termo $(\sigma_s / \beta)^{1/2}$ é aproximadamente igual à inclinação média das asperezas. A ocorrência de deformação plástica nos contatos é determinada pelo valor de ψ . Para valores de $\psi < 0,6$ a deformação plástica nas asperezas só ocorre com pressões nominais de contato muito altas. Já para valores de $\psi > 1$, a maioria das asperezas se deforma plasticamente mesmo sobre pressões nominais baixas. Mesmo para metais polidos, ψ é superior a 1 e o contato entre as asperezas é predominantemente plástico (Hutchings 2001). No caso de cerâmicas e polímeros, que possuem menor índice (E' / H), o contato predominante é no regime elástico.

O índice de plasticidade de Greenwood e Williamson (1966) é um marco na caracterização do contato elástico/plástico, embora existam índices um pouco diferentes (vide Whitehouse 1994).

2.2.4.2 Fatores que afetam a área real de contato nos sólidos viscoelásticos

Em altos carregamentos a força normal será a principal responsável pela alteração da área real de contato, onde a resposta do sistema se aproxima muito da formulação de Hertz (1896; vide item 2.3 Modelos para estimativa da área real de contato). Porém, para materiais viscoelásticos, a variação da área de contato não é linearmente dependente do carregamento. Para altos carregamentos a área real de contato se aproxima muito da área aparente, e para baixos carregamentos a força de adesão irá influenciar fortemente.

A área real de contato será sempre proporcional ao módulo de elasticidade dos materiais em contato e quanto maior o módulo de elasticidade, menor a área real de contato para suportar o mesmo carregamento de referência. A Figura 8 a seguir compara a área real de contato de materiais diferentes para um mesmo carregamento, onde sugere que a área real de contato será maior para o par plástico-metal.

Figura 8 - Comparação da área real de contato para (a) metal-metal e (b) plástico-metal. (Adamson, 1967)

A força normal que atua nas superfícies não é a única força que irá determinar a área de contato. A baixos carregamentos, a força de adesão terá grande contribuição na área real de contato, principalmente em materiais de baixo módulo de elasticidade como os elastômeros.

Adesão é o estado em que duas superfícies são mantidas unidas por meio de forças físicas, químicas ou físico-químicas. (ISO 1382:2008 e ASTM D 1566:2009). Em casos que a adesão é relativamente forte, é necessária a aplicação de esforços para a separação das superfícies em contato.

Se o módulo de elasticidade do material for suficientemente baixo, e caso não haja deslizamento relativo entre as superfícies, a força requerida para achatar as asperezas poderá ser menor que a força de atração entre as superfícies, fazendo com que a área de contato entre as superfícies aumente devido à força de adesão, vide Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Quando não há deslizamento, a borracha é capaz de se deformar e acompanhar todo o contorno das rugosidades superficiais. (Persson, 1997)

É possível observar nas experiências feitas por Persson (1997 e 1999), que a força de adesão pode fazer com que a borracha acompanhe o perfil do substrato, porém, caso a borracha esteja deslizando no substrato, esta ganha rigidez superficial e não consegue acompanhar o perfil de comprimento de onda mais longo.

Em seu artigo, Persson (1999) demonstra em qual faixa de ondulações superficiais a força de adesão é capaz de deformar a borracha e seguir o perfil do substrato. Não será demonstrada essa formulação nesse trabalho.

Figura 10 – (a) Uma superfície lisa de borracha deslizando sobre um substrato duro. (b) Sem deslizamento relativo, a força de adesão é capaz de deformar a borracha a ponto de preencher completamente o perfil do substrato. (Persson, 1999)

Quando estudando as forças de adesão é importante que um bom contato seja estabelecido entre as superfícies. A rugosidade e partículas entre os corpos afetam a distância entre os mesmos, o que tem grande efeito na força de adesão. A seguir, podem ser observadas duas superfícies na presença de contaminantes, onde o contato entre as superfícies fica muito prejudicado e o contato íntimo e pleno entre as superfícies não ocorre. Seja na presença de contaminantes sólidos (*debris* proveniente do desgaste do material, poeira, etc.) Figura 11, ou contaminantes líquidos adsorvidos ou usados como lubrificantes (água, óleos, etc.) Figura 12.

Figura 11 – Borracha deslizando sob um substrato duro, na presença de contaminante sólido. (Persson 1997)

Figura 12 – Borracha deslizando em substrato duro, na presença de água na superfície. (Persson 1997)

Devido a sua importância, a limpeza das superfícies foi revisada e resumida no Anexo 1.

As observações de Johnson, Kendall e Roberts (1971) mostraram a influência de forças de atração entre as superfícies de sólidos em contato, onde, para forças normais elevadas a contribuição da força de adesão é pequena. Entretanto, quando o carregamento tende a zero, a importância da força de adesão aumenta. JOHNSON, KENDALL E ROBERTS (1971) descrevem a área de contato, aumentada pela força de adesão, em função da energia de superfície dos materiais em contato. Os experimentos de Johnson, Kendall e Roberts (1971), como descrito em seu artigo, foram realizados em superfícies opticamente limpas e lisas e com materiais de baixo módulo de elasticidade (0,8 MPa).

Energia de superfície é o trabalho necessário para criar uma unidade de área de uma nova superfície no corpo do material. (ASM Handbook, 1992) Um experimento difícil é comumente aplicado para definir a energia de superfície, γ_s , como metade do trabalho reversível, W_c , requerido para dividir um sólido monolítico para criar duas novas superfícies de área unitária, e então realizar a separação dessas superfícies em vácuo. (ASM Handbook, 1992) Quando um sólido não está em vácuo, mas está em contato com líquido ou vapor, a energia é considerada em termos de energia interfacial, γ_{SL} ou γ_{SV} , ao invés de energia de superfície. (ASM Handbook, 1992)

Além da energia de superfície, Derjaguin, Muller e Toporov (1975) descrevem que a energia eletrostática e as forças de Van der Waals irão influenciar a área de contato entre as superfícies e que essas forças devem fazer parte da formulação da força de adesão entre os sólidos.

Robert e Othman (1976), e vários outros pesquisadores, em seus artigos não consideram diretamente a energia eletrostática e as forças de Van der Waals. Esses pesquisadores consideram a energia de separação (*peel energy*, γ , $\text{mJ/m}^2 = \text{erg/cm}^2$) entre os corpos, que é calculada a partir da força necessária para separar os corpos em contato, utilizando a formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971). Ou seja, a energia de separação leva em consideração todas as forças

atuantes na superfície de contato. A energia de separação (γ) é igual a energia livre de superfície equivalente para a força de separação encontrada.

Na Figura 13 a seguir estão os resultados de energia de separação encontrados por Roberts e Othman (1977) em função da variação da força normal aplicada. Os resultados indicam que com o aumento da força normal há também um aumento da força de separação. Esse comportamento é explicado pelo aumento da área real de contato, e quando o carregamento é retirado, a força de adesão mantém as superfícies unidas fazendo com que a energia para separar as superfícies seja maior.

Figura 13 – Influência da força normal. Os resultados da variação da energia de separação (γ) em função da velocidade de retirada do carregamento (V) indicam que o aumento da força normal promove aumento na força de adesão. (Roberts e Othman, 1977)

Roberts e Othman (1977) também descrevem em seu artigo que o tempo de exposição ao carregamento afeta a energia de separação entre superfícies. Quanto maior o tempo de exposição ao carregamento, maior a força necessária para separar as superfícies. Esse comportamento é explicado pela propriedade viscoelástica dos materiais elastoméricos, que faz com que haja aumento da área

real de contato entre os sólidos em função do tempo de exposição. Com o aumento da área real de contato a energia necessária para separar as superfícies é maior. A Figura 14 a seguir mostra os resultados de energia de separação em função do tempo de exposição ao carregamento, obtidos por Roberts e Othman (1977).

Figura 14 – Resultados do tempo de exposição de borracha natural vulcanizada com enxofre, expressos em função da energia de separação (γ) e da velocidade de retirada do carregamento (V). O nível de energia de separação aumenta com o aumento do tempo de exposição. (Roberts e Othman, 1977)

Na Figura 15 a seguir, estão os resultados de energia de separação em função do tempo de exposição e taxa de separação no contato entre hemiesferas de borracha natural contra uma superfície de vidro, encontrados por Roberts e Othman (1977). Os resultados de energia de separação, agora não em escala logarítmica, sugerem que uma pequena variação no tempo de exposição pode aumentar significativamente a energia de separação, e que o tempo de apenas frações de segundos é necessário para que adesão seja estabelecida entre os sólidos.

Figura 15 – A extrapolação da curva de energia de separação (γ) contra o tempo de espera (t), sugere que um tempo mínimo de 0,1 seg deve acontecer para que a adesão seja estabelecida. Experimentos realizados com borracha natural vulcanizada com enxofre. (Roberts e Othman, 1976)

A energia de separação (γ) também é dependente da taxa de separação das superfícies. Esse comportamento é atribuído à influência da histerese do material na adesão.

Roberts e Thomas (1974) descrevem que a energia de separação pode atingir uma variação da magnitude de 10^4 , devido à histerese do material e em seus experimentos com borracha natural e uma superfície de vidro os resultados de energia de separação foram muito superiores aos estimados pela formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971).

Nos experimentos de Briscoe, Arvanitaki, Adams e Johnson (2001), a estimativa da força requerida para a separação entre as superfícies era de -2,04 mN, utilizando a formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971). Porém, o valor registrado de força de separação entre as superfícies foi de aproximadamente -12 mN. Essa diferença nos resultados foi atribuída ao fenômeno de histerese na adesão.

O comportamento viscoelástico das borrachas pode ser controlado pelo grau de vulcanização. Quanto maior o número de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas de uma borracha, provenientes do processo de vulcanização, menor será seu comportamento viscoso. As ligações cruzadas restringem a movimentação relativa entre as cadeias poliméricas.

Em temperaturas relativamente baixas, algumas borrachas podem encontrar-se abaixo da temperatura de transição vítrea, fazendo com que o material seja extremamente frágil e não tenha resposta viscosa. Em temperatura ambiente, foco deste trabalho, o comportamento da maioria das borrachas é predominantemente elástico, com alguma influência do comportamento viscoso. Já à temperaturas relativamente elevadas, o comportamento elástico passa a ser superado pelo comportamento viscoso e as forças de adesão passam a ser mais elevadas.

Embora o estudo das propriedades das borrachas mostre a importância da temperatura, a busca bibliográfica não encontrou referências sobre a relação entre a área de contato de borracha em função da temperatura. Neste trabalho não será detalhada a influência da temperatura no contato de materiais (comportamento do material e variação da área de contato). Na literatura de referência (Moore e Geyer 1972, Zhang 2004) podem ser encontrados estudos da influência da temperatura em relação à variação do coeficiente de atrito entre os materiais.

2.3 MODELOS PARA ESTIMATIVA DA ÁREA REAL DE CONTATO

Nos primeiros estudos da área de contato entre duas esferas, Hertz (1881 e 1896) mostra a área de contato dependente apenas do carregamento. Essa formulação de Hertz tem aplicação para materiais metálicos, mas restringe sua aplicação quando considerados materiais elastoméricos como a borracha (Johnson, Kendall e Roberts, 1971).

2.3.1 Estimativa da área real de contato sem adesão

Resume-se a seguir a formulação de Hertz (1881 e 1896). Nessa formulação, o material e o raio das esferas não necessitam ser o mesmo, e no limite, uma esfera pode ser um plano.

2.3.1.1 Modelo simplificado de Hertz (1881)

Raio “a” da área de contato - Esfera / Plano:

$$a^3 = \frac{3.w.R}{4.E}$$

Equação 5

Onde,

a – raio da área de contato [mm]

w – força normal aplicada [N]

R – raio da esfera [mm]

E – módulo de elasticidade [N/mm²]

2.3.1.2 Modelo detalhado de Hertz (1896)

Constante elástica do material

$$k = \frac{(1 - \nu^2)}{\pi.E}$$

Equação 6

Raio “a” da área de contato

$$a^3 = \frac{3.\pi}{4} \cdot (k_1 + k_2) \cdot \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2} \cdot w$$

Equação 7

Onde:

a – raio da área de contato

R₁ e R₂ – raio das esferas

k₁ e k₂ – constante elástica

ν - constante de Poisson

E – módulo de elasticidade

w – força normal aplicada

A distribuição da pressão na área de contato de uma esfera é dada por:

$$p = \frac{3.w}{2.\pi.a^2} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{R^2}{a^2}\right)} \quad \text{Equação 8}$$

Hertz também formulou o deslocamento elástico (δ) das superfícies em contato. Pelo resultado da compressão, dois pontos próximos à região de contato nas duas esferas se aproximam de uma distância δ , dada por:

$$\delta^3 = \frac{9}{16} \cdot \pi^2 \cdot (k_1 + k_2)^2 \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{(R_1.R_2)} \cdot P_0^2 \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

R_1 e R_2 – raio da esfera

k_1 e k_2 – constante elástica

P_0 – carregamento inicial

Hertz utilizou um microscópio óptico para realizar a medição da área de contato entre esferas de vidro em contato, e baseado nesses resultados validou sua teoria experimentalmente. (Johnson, Kendal & Roberts, 1971)

2.3.2 Estimativa da área real de contato com adesão

O estudo da área real de contato, levando em consideração a adesão entre os sólidos, foi feito por Johnson, Kendall e Roberts (1971). Usando esferas de borracha e gelatina, JOHNSON, KENDALL E ROBERTS (1971) notaram que em baixos carregamentos as áreas de contato entre os corpos eram consideravelmente maiores que a área prevista por Hertz e tendiam a uma área constante e finita quando o carregamento se aproximava de zero.

Na Figura 16 a seguir pode ser observado o raio de contato “a” de uma esfera em contato com um plano. Quando não há presença de carregamento, a equação de Hertz (1896) remeteria a um raio de contato também igual a zero (Figura 16a).

Porém, na presença de forças de adesão (γ_r , γ_g e γ_{rg}) (Figura 16b), o raio “a” de contato é bem superior ao previsto pela equação de Hertz.

Figura 16 – Adesão entre esferas elásticas e um substrato plano (a) na ausência de adesão e (b) na presença de adesão. (Roberts, 1976)

Experimentos realizados por Johnson, Kendall e Roberts (1971), descrevem que a área de contato de duas esferas de borracha em contato depende não somente do carregamento, mas também da energia livre de superfície. A área real de contato de duas esferas, sob a influência da energia livre de superfície, é aumentada e com isso a distribuição de esforços nas superfícies também fica alterado e se torna esforços de tração nas extremidades do contato e somente permanece compressivo no centro do contato.

Nas Figuras a seguir (Figura 17 e Figura 18) é ilustrado a variação de área de duas esferas em contato e a distribuição de esforços atuantes.

Figura 17 – Contato entre duas superfícies convexas de raios R_1 e R_2 sob carregamento normal de P_0 . Onde a_0 é o raio de contato pela teoria de Hertz, a_1 é o raio de contato entre as duas superfícies e δ é o deslocamento elástico. (Johnson, Kendall e Roberts 1971)

Figura 18 – Distribuição de esforços no contato de superfícies esféricas. Quando as superfícies são mantidas em contato com uma área de superfície aumentada por forças superficiais, os esforços são de tração (T) nas extremidades do contato e só permanecem compressivos (P) no centro. A distribuição “A” são os esforços por Hertz com $a=a_1$ e $P=P_1$; A distribuição “B” são os esforços reais (Johnson 1958) com $a=a_1$ e $P=P_0$; e a distribuição “C” são os esforços por Hetz com $a=a_0$ e $P=P_0$. (Johnson, Kendall e Roberts 1971)

Em alto carregamento, os resultados são muito próximos dos previstos por Hertz (1896), porém, para baixos carregamentos a força de adesão se torna bastante evidente, fazendo com que a área de contato seja altamente influenciada por esta. A força de adesão irá influenciar principalmente materiais viscoelásticos como os elastômeros, devido ao baixo módulo de elasticidade.

Persson (1997), em seus estudos, descreve que em experimentos com borracha, é usualmente encontrado que o coeficiente de atrito μ é independente do carregamento, mas, isso não é verdadeiro quando trabalhando com carregamentos muito pequenos ou muito grandes. Quando o carregamento é muito pequeno, a força de adesão torna-se muito importante e quando o carregamento é muito elevado, a área real de contato se aproxima da área aparente de contato e, portanto, a área real não pode aumentar linearmente com o carregamento.

Devido à importância para a análise dos resultados desta dissertação, a seguir, apresentam-se as duas análises feitas por Johnson, Kendall e Roberts (1971) para a área de contato, considerando a energia de superfície. As análises são: teoria aproximada e análise exata.

Teoria aproximada do contato de sólidos elásticos

A teoria aproximada pode ser representada em termos da energia de superfície. Considerando duas esferas elásticas em contato sob carregamento zero (sem força normal atuante), as forças de superfícies atuantes são suficientemente fortes para produzir uma área de contato finita de raio “a”.

De acordo com Johnson, Kendall e Roberts (1971), as forças de superfícies podem ser estimadas e atuará em adição à força normal aplicada no corpo. Abaixo está a formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971) para esta força:

$$F_S \approx \frac{\pi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \gamma}{(R_1 + R_2)} \quad \text{Equação 10}$$

Essas forças de superfície irão influenciar fortemente a área de contato quando:

$$P_0 \approx \frac{\pi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \gamma}{(R_1 + R_2)} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

R_1 e R_2 – raio da esfera

γ – energia de superfície

Nesta teoria aproximada, mesmo considerando o aumento de área devido às forças de superfície, a distribuição de pressão é assumida ser Hertziana. No entanto, superfícies esféricas que são mantidas em contato apresentam uma distribuição de esforços onde na extremidade do contato as forças são de tração e só permanecem compressivas no centro. A representação da distribuição de esforços na superfície foi calculada por Johnson (1958) e pode ser observada na Figura 18.

Análise exata do contato de sólidos

A completa demonstração da formulação da chamada “análise exata” pode ser encontrada no artigo de Johnson, Kendall e Roberts (1971). Neste trabalho apenas será mostrada a conclusão e resultados que foram atingidos pelos estudos.

No equilíbrio, o carregamento aparente de Hertz (1896) para se atingir a área real de contato para uma superfície de energia γ é P_1 , o qual é maior que P_0 . Isso se deve ao fato de Hertz não ter considerado as forças de superfície. A seguir está a formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971) para o carregamento P_1 de Hertz:

$$P_1 = P_0 + (3.\gamma.\pi.R) + \sqrt{(6.\gamma.\pi.R.P_0) + (3.\gamma.\pi.R)^2} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

P_1 – carregamento de Hertz para área de contato, considerando as forças de superfície

P_0 – carregamento de Hertz para a área de contato, não considerando as forças de superfície

γ – energia de superfície

$$R = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2} \quad R_1 \text{ e } R_2 \text{ – raio da esfera}$$

A equação de Hertz modificada por Johnson, Kendall e Roberts (1971), para cálculo do raio de contato de esferas, levando-se em consideração a energia de superfície é:

$$a^3 = \frac{R}{K} \cdot \left(P_0 + (3.\gamma.\pi.R) + \sqrt{(6.\gamma.\pi.R.P_0) + (3.\gamma.\pi.R)^2} \right) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

P_0 – carregamento de Hertz para a área de contato, não considerando as forças de superfície

a – raio de contato

γ – energia de superfície

$$R = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2} \quad R_1 \text{ e } R_2 \text{ – raio da esfera}$$

$$K = \frac{4}{3 \cdot \pi \cdot (k_1 + k_2)}$$

k_1 e k_2 – constante elástica do material

Caso a energia de superfície seja zero, tem-se:

$$a^3 = \frac{R}{K} \cdot \left(P_0 + (3 \cdot 0 \cdot \pi \cdot R) + \sqrt{(6 \cdot 0 \cdot \pi \cdot R \cdot P_0) + (3 \cdot 0 \cdot \pi \cdot R)^2} \right)$$

$$a^3 = \frac{R}{K} \cdot P_0$$

Equação 14

E a zero carregamento, a área de contato é:

$$a^3 = \frac{R}{K} \cdot (6 \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R)$$

Equação 15

Para carregamentos negativos na separação das superfícies, possível devido às forças de superfície que tende a manter as superfícies unidas, a área de contato diminui e somente acontece a total separação entre as superfícies quando:

$$P = -\frac{3}{2} (\gamma \cdot \pi \cdot R)$$

Equação 16

Experimentos realizados por Johnson, Kendall e Roberts (1971)

Observa-se nas experiências de JOHNSON, KENDALL E ROBERTS (1971), Figura 19 a seguir, que quanto menor a energia de superfície, maior a concordância da área de contato com a teoria de Hertz. Porém, quando se aumenta a energia de superfície, maior é a variação em relação a teoria de Hertz. Quando as superfícies encontram-se limpas de impurezas e secas, maior será a adesão.

Esferas de borracha e gelatina foram usadas para a realização dos experimentos e estudos de Johnson, Kendall e Roberts (1971). Nos experimentos, o módulo de Young das esferas utilizadas foi de $8 \times 10^6 \text{ [dyn/cm}^2\text{]} = 0,8 \text{ [MPa]}$.

Figura 19 - Resultados para duas esferas de borracha ($R_1 = R_2 = 2,2$ cm) em contato seco e lubrificado. +, contato seco; o, contato com água; x, contato com solução SDS (Dodecil Sulfonato de Sódio); ---, teoria de Hertz; —, teoria modificada por Johnson, Kendall e Roberts (1971).

A seguir encontram-se os valores de energia de superfície (γ) desse experimento:

Contato Seco
$$\gamma = 71 \pm 4 \left[\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Contato com Água
$$\gamma = 3,4 \pm 0,2 \left[\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Contato em solução SDS (Dodecil Sulfonato de Sódio)
$$\gamma = 0$$

Quando em contato com esta solução molar (SDS), os resultados foram praticamente iguais aos de Hertz.

Com os resultados desse estudo foi possível observar que a análise de superfície de contato deveria ser realizada considerando-se também a adesão, proveniente da energia de superfície, pois esta alterava a área de contato sensivelmente em determinadas faixas de carregamento, principalmente para materiais elastoméricos.

Durante a realização do experimento, Johnson, Kendall e Roberts (1971), perceberam que o equilíbrio da área de contato não foi estabelecido instantaneamente. Depois de carregadas em contato, o raio de contato continuou alterando por algum tempo. Esse comportamento foi assumido (Johnson, Kendall e Roberts 1971) ser devido às forças viscosas que são dependentes da taxa de separação das superfícies e não foram consideradas na análise desses pesquisadores.

Para altos carregamentos, o equilíbrio foi estabelecido em poucos segundos, mas conforme o carregamento foi sendo reduzido e se aproximando a zero, o tempo para equilíbrio da área de contato subia para alguns minutos. Para carregamentos negativos (força para separação das superfícies), próximo a carga de separação dos corpos, o equilíbrio demorava tanto para ser estabelecido que ficava difícil decidir quando este era alcançado (Johnson, Kendall e Roberts 1971). Nos estudos preliminares realizados por eles, a força de separação variou largamente de 0,5 g a 5,0 g. Portanto, em seu experimento, JOHNSON, KENDALL E ROBERTS (1971), utilizaram alguns mecanismos (para descrição do procedimento, vide artigo) para evitar esta variação e ter um padrão de medição. Esses mecanismos possibilitavam que o tempo de contato no descarregamento fosse sempre o mesmo, dessa forma eles minimizaram a variação devido ao tempo de equilíbrio. Mesmo com essa metodologia, os resultados variaram menos para as experiências com esferas de gelatina do que com as esferas de borracha, uma vez que as forças viscosas na gelatina são menos dominantes.

A seguir está o resultado da experiência feita com esferas de borracha (Johnson, Kendall e Roberts 1971). É possível observar que se o comportamento fosse como o descrito por Hertz, a carregamento zero as esferas não possuiriam área de contato. Porém, a área de contato permaneceu positiva mesmo quando o carregamento atingiu zero.

Figura 20 – Resultados para esfera de borracha ($R=2,2$ cm) em contato seco com uma placa lisa de borracha sob carregamentos leves positivos e negativos. O, resultados do contato; ---, teoria de Hertz; —, teoria modificada. (Johnson, Kendall e Roberts 1971)

Para as esferas de gelatina também é possível observar que a área de contato é diferente da prevista por Hertz, devido à influência de energia superfície.

Figura 21 – Contato seco para esferas de gelatina, com diferentes raios de curvatura, pressionadas contra uma superfície plana e lisa de Perspex. O, 2,45 cm de raio; X, 7,9 cm de raio; □, 25,5 cm de raio; ---, teoria de Hertz; —, teoria modificada. (Johnson, Kendall e Roberts 1971)

A Figura 22 a seguir mostra o resultado obtido por Johnson, Kendall e Roberts (1971) no contato de esferas de gelatina. Os eixos estão representados sem escala para que se pudesse fazer a sobreposição das curvas de diversas esferas de gelatina de diâmetros diferentes. Dessa maneira pode ser observado se há diferença na tendência do comportamento no contato devido à diferença de diâmetro.

Figura 22 – Resultado para esferas de gelatina em contato seco com uma superfície plana e lisa de Perspex sob pequenos carregamentos positivos e negativos, demonstrados no gráfico sem escala dimensional. O, 2,45 cm de raio; X, 7,9 cm de raio; □, 25,5 cm de raio; ---, teoria de Hertz; —, teoria modificada. (Johnson, Kendall e Roberts 1971)

Nota-se que para diferentes diâmetros o comportamento no contato permanece o mesmo, e tanto para carregamentos positivos quanto carregamentos negativos, a teoria modificada (Johnson, Kendall e Roberts 1971) apresenta bastante coerência com os resultados experimentais.

As equações de Johnson, Kendall e Roberts (1971) são válidas para baixos carregamentos de superfícies sólidas esféricas. Teoria comprovada por experimentos feitos no contato de esferas de borracha e gelatina. Em seu artigo, JOHNSON, KENDALL E ROBERTS (1971) descrevem que não levaram em consideração o efeito das forças viscosas, porém, relatam que esta tem efeito sobre a força necessária para separar as superfícies em contato.

Muitos outros pesquisadores mostraram que a energia de superfície não é a única a alterar a área de contato entre sólidos viscoelásticos. Derjaguin, Muller e Toporov (1975) descrevem a influência da energia eletrostática e das forças de Van der Waals. Roberts e Thomas (1975), entre outros, descrevem que o tempo de exposição ao carregamento e as forças viscosas irão afetar a energia de separação entre as superfícies e que a força necessária para separar as superfícies em contato são maiores que as previstas por Johnson, Kendall e Roberts (1971). Vide item

2.2.4.2 Fatores que afetam a área real de contato nos sólidos viscoelásticos, para mais detalhes.

2.4 COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estimativa dos resultados do contato estático entre esferas de borracha contra uma superfície de vidro utilizando o modelo de Johnson, Kendall e Roberts (1971) foi coerente em estudos experimentais realizados por eles, bem como, com os trabalhos realizados por Briscoe, Arvanitaki, Adams e Johnson (2001). Esses dois trabalhos não consideraram experimentalmente o efeito do tempo sob carregamento na área de contato.

O efeito do tempo de exposição ao carregamento foi investigado por Roberts e Othman (1977). Esses autores, porém, não estudaram a variação de área de contato, mas sim a variação da energia de separação em função do tempo de exposição ao carregamento. Roberts e Othman (1977) também estudaram a variação da energia de separação em função da variação do carregamento.

Outra importante contribuição foi feita por Briscoe, Arvanitaki, Adams e Johnson (2001) que da observação da área de contato no descarregamento de hemiesferas de borracha com uma superfície de vidro, verificaram que a histerese do material influencia consideravelmente a área de contato e a energia de separação entre as superfícies.

A revisão bibliográfica mostra, portanto que a estimativa e a verificação da área de contato entre borracha e um corpo rígido está baseada essencialmente nos resultados de um único grupo de pesquisadores. Esta constatação e a importância do tema colocam o objetivo deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentam-se nesse item, os materiais e métodos experimentais desse trabalho.

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir estão descritos os procedimentos experimentais adotados para a realização dos experimentos desse trabalho.

Os materiais foram limpos utilizando o método descrito no item 3.4 (Limpeza das hemiesferas e chapa de vidro) e após a limpeza foram realizadas as experiências.

3.1.1 Aplicação de massa

Para medir a área de contato em função da variação da força normal aplicada, as hemiesferas de borracha foram posicionadas em forma de triângulo equilátero, a uma distância de 80 mm entre elas (distância entre centros das hemiesferas), sobre a bancada. A chapa de vidro tinha forma de um triângulo equilátero e foi posicionada sobre as três hemiesferas (vide Figura 23).

A massa inicial da experiência foi de 45 g (45 g é a massa da chapa de vidro superior e, portanto, cada hemiesfera recebeu a carga equivalente a 15 g). A aplicação de massa foi realizada da seguinte forma:

- 15 g em 15 g até 120 g
- 30 g em 30 g até 270 g
- 60 g em 60 g até 570 g

A aplicação de massa foi feita empregando-se discos de massa aferida. Toda a deposição de massa foi realizada no centro da chapa de vidro superior para que a massa fosse distribuída igualmente entre as 3 hemiesferas. Foram aplicadas as seguintes massas totais: 45 – 60 – 75 – 90 – 105 – 120 – 150 – 180 – 210 – 240 – 270 – 330 – 390 – 450 – 510 – 570 g. Em decorrência cada hemiesfera foi solicitada por uma massa de: 15 – 20 – 25 – 30 – 35 – 40 – 50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 110 – 130 – 150 – 170 – 190 g.

Devido à aplicação das forças normais, observava-se na superfície de contato entre as hemiesferas de borracha e a chapa de vidro uma área de contato. As áreas de contato eram circulares e tiveram seus diâmetros medidos em fotografias feitas em lupa com câmera fotográfica digital (Figura 23).

Para minimizar o efeito do tempo de exposição ao carregamento, a área de contato foi registrada a aproximadamente 5 segundos após a aplicação do carregamento. Esse procedimento foi realizado para todas as medições e carregamentos.

Para o cálculo das áreas de contato das hemiesferas de borracha com a placa de vidro, mediram-se 4 diâmetros distintos em cada uma das áreas determinadas por duas das hemiesferas. A partir dessas 8 determinações foi obtido o diâmetro médio, seu intervalo de confiança 95% e, então, calculada a área de contato.

3.1.2 Força de adesão

Para medir a força de separação entre a hemiesfera de borracha e a superfície de vidro, foi realizado o seguinte experimento: uma hemiesfera de borracha foi colocada sobre a superfície de uma balança (com sensibilidade de 0,1 g) e sobre a hemiesfera foi colocada a chapa de vidro, de forma que a hemiesfera ficasse no centro da chapa de vidro.

A separação entre as superfícies foi realizada por meio de aplicação de massa em um contrapeso até o momento em que houve a completa separação entre as superfícies. A massa do contrapeso foi medida e registrada.

Conforme descrito nos estudos de Roberts e Othman (1977), a variação do carregamento aplicado e o tempo de exposição ao carregamento afetam a resposta do sistema em relação à força de adesão. Portanto, a força normal inicial aplicada na superfície foi sempre a mesma (45 g, que é a massa da chapa de vidro) para todas as hemiesferas, e o tempo de retirada do carregamento até separação das superfícies foi de aproximadamente 5 segundos.

A força de separação foi registrada e com os resultados foram calculadas as energias de separação entre os corpos.

3.1.3 Efeito do tempo de contato

Para a avaliação do efeito do tempo de contato, as hemiesferas de borracha foram posicionadas em forma de triângulo equilátero, a uma distância de 80 mm entre elas (distância entre centros das esferas), sobre a bancada. A chapa de vidro triangular equilátera foi posicionada sobre as três hemiesferas (vide Figura 23).

A massa inicial total da experiência foi de 250 g (45g da chapa de vidro, mais 205g colocados no centro da chapa de vidro). A massa foi mantida constante e a área de contato entre as hemiesferas de borracha e chapa de vidro foi medida de 2 em 2 minutos até 16 minutos.

Após a última medição, a massa que estava sobre a chapa de vidro (205 g) foi retirada e o procedimento de medição foi repetido para o descarregamento. No descarregamento foi retirada apenas a carga de 205 g, uma vez que era necessário manter a chapa de vidro para que se pudesse observar a área de contato.

Para o cálculo das áreas de contato das hemiesferas de borracha com a placa de vidro, mediram-se 4 diâmetros distintos nas áreas determinadas por cada

hemiesfera. A partir dessas 4 determinações foi obtido o diâmetro médio, seu intervalo de confiança 95% e, então, calculada a área de contato.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

As observações das áreas de contato foram feitas em uma lente NIKON SMZ800 estereoscópica (utilizando-se a lente da direita), equipada com uma câmera digital NIKON DXM1200F (vide Figura 23). Esse equipamento permite registrar a área de contato entre a hemiesfera de borracha e a superfície de vidro. Conforme especificada a ampliação da imagem, o programa gera a escala que a foto foi gerada possibilitando a medição da área de contato.

Figura 23 – Equipamento NIKON utilizado para registrar a área de contato das esferas de borracha com a superfície de vidro

Para as medidas de massa, empregou-se uma balança MJ-3000 com sensibilidade de 0,1 g.

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram empregadas quatro qualidades de borracha nas quais variaram-se as propriedades elásticas e a propensão a adesão. Obtiveram-se um total de 12 hemiesferas de borracha, três para cada tipo, com as seguintes propriedades (vide Tabela 1 a seguir):

Tipo de borracha	Semi esfera	Massa [g]	Rugosidade Ra [μm] Rmax [μm]	Diâmetro [mm]	Módulo de Elasticidade [MPa]	Tan δ	Dureza [Shore A]
Enchimento ("A")	A 1	7,74	Ra = 0,6 Rmax = 0,8	30	16,8	0,132	87
	A 2	7,82					
	A 3	7,75					
Rodagem ("B")	B 1	7,63	Ra = 0,6 Rmax = 0,8	30	5,77	0,158	68
	B 2	7,64					
	B 3	7,63					
Lateral ("C")	C 1	7,24	Ra = 0,6 Rmax = 0,8	30	5,42	0,111	57
	C 2	7,26					
	C 3	7,17					
Estanque ("D")	D 1	7,54	Ra = 0,6 Rmax = 0,8	30	2,64	0,277	44
	D 2	7,58					
	D 3	7,52					

Tabela 1 – Materiais (hemiesferas e chapa de vidro) utilizados para a medição da área de contato.

A variação de massa foi considerada adequada aos experimentos. A rugosidade informada na tabela acima refere-se a rugosidade final do molde de vulcanização das hemiesferas. O molde foi fabricado utilizando-se a classe de rugosidade N6, baseado nas normas DIN 4761/2 e normas correlacionadas DIN 4768 / 4777 e ISO 3274 / 4288. O material do molde foi o aço H13.

Os constituintes empregados na elaboração das borrachas estão descritos na tabela 2 a seguir. Nas indústrias de borracha a porcentagem de referência de um componente é calculada em PHR (*Percentage per Hundred Rubber*) e representa a quantidade deste componente em relação a cem partes de borracha presente no composto.

Material	Negro de Fumo (PHR)	Sílica (PHR)	Borracha Natural (PHR)
Enchimento ("A")	35	0	40
Rodagem ("B")	20	15	100
Lateral ("C")	25	0	35
Estanque ("D")	30	0	0

Tabela 2 – Composição das hemiesferas utilizadas neste trabalho.

O apoio de vidro colocado sobre as hemiesferas tinha formato de triângulo equilátero, de arestas 121 mm e espessura 3 mm.

O módulo de elasticidade e $\tan \delta$ foram obtidos com um corpo de provas retangular (14 mm de largura, 25 mm de comprimento e 2 mm de espessura) utilizando um Instron Dinâmico (modelo 1332), com frequência de 10 Hz, deformação de 7,5 mm e temperatura de 23°C.

A dureza foi medida através de um durômetro de escala Shore A - ASTM D2240 (Instrumento & MFG. Co. Inc.).

3.4 LIMPEZA DAS HEMIESFERAS E CHAPA DE VIDRO

A limpeza do vidro e das esferas visou diminuir o efeito substâncias adsorvidas nas superfícies. Considerou-se que o método usado por Langmuir (1919) para a limpeza de ácidos oléicos (ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de gordura animal ou óleos vegetais) é muito agressivo para as borrachas. Por outro lado, o procedimento de limpeza empregando álcool isopropílico descrito por Roberts e Othman (1977), embora eficaz para a borracha, é demorado e foi associado à perda de massa de borracha. Em função disso, as superfícies de vidro e de borracha foram lavadas com água corrente e detergente (Surfactante: Alquilbenzeno Linear Sulfonato de Sódio; Glicerina, sequestrante e coadjuvantes). Depois de lavadas com o detergente, as superfícies foram enxaguadas em água corrente e então secas por meio de um secador (ar quente e seco soprado contra a superfície limpa).

3.4.1 Resultado da limpeza

A avaliação da limpeza foi feita empregado o procedimento adotado por Langmuir (1919) que consistiu em colocar uma gota de água sobre a superfície limpa do vidro, e verificar se ao se mover, a gota de água deixaria um fino filme de água por todo o percurso. Foram realizadas duas avaliações empregando-se os materiais sem e com limpeza observando-se nos materiais limpos a formação do filme de água.

A conclusão que se pode chegar é que o método adotado para a limpeza das superfícies utilizando detergente (Surfactante: Alquilbenzeno Linear Sulfonato de Sódio; Outros Componentes: Glicerina, sequestrante e coadjuvantes), mostrou-se eficaz na remoção de ácidos oléicos e óleos parafínicos adsorvidos na superfície dos materiais.

Considerando os resultados de Roberts e Othman (1977) sobre o afloramento de partículas presentes no interior do material durante o tempo de armazenagem, todos os materiais foram limpos e secos momentos antes das experiências.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

4.1 EFEITO DA MASSA APLICADA NA ÁREA DE CONTATO

As medições foram realizadas em duas hemiesferas de borracha de cada composto. Nas tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam-se os resultados das experiências realizadas.

Massa por esfera [g]	Diâmetro da área de contato [mm]								Média	Des. Pad. (σ)	Intervalo de Confiança (95%)	
	A 1				A 2						Limite Inf.	Limite Sup.
15	0,89	0,93	0,94	0,95	1,02	1,00	1,04	1,03	0,98	0,06	0,94	1,01
20	0,92	0,91	0,95	0,96	1,09	1,07	1,08	1,11	1,01	0,08	0,95	1,07
25	1,02	1,01	0,99	1,03	1,13	1,11	1,15	1,11	1,07	0,06	1,02	1,11
30	1,11	1,04	1,04	1,10	1,17	1,13	1,13	1,16	1,11	0,05	1,08	1,14
35	1,12	1,11	1,14	1,15	1,21	1,22	1,20	1,27	1,18	0,06	1,14	1,22
40	1,24	1,22	1,22	1,23	1,27	1,25	1,23	1,29	1,24	0,03	1,23	1,26
50	1,36	1,36	1,33	1,35	1,37	1,34	1,33	1,42	1,36	0,03	1,34	1,38
60	1,36	1,38	1,34	1,37	1,43	1,41	1,40	1,47	1,40	0,04	1,37	1,42
70	1,41	1,41	1,39	1,40	1,54	1,52	1,50	1,55	1,46	0,07	1,42	1,51
80	1,44	1,43	1,43	1,41	1,60	1,58	1,58	1,64	1,52	0,09	1,45	1,58
90	1,53	1,52	1,48	1,52	1,69	1,60	1,62	1,71	1,58	0,09	1,53	1,64
110	1,62	1,58	1,60	1,61	1,74	1,72	1,66	1,78	1,66	0,07	1,61	1,71
130	1,71	1,68	1,70	1,70	1,86	1,80	1,81	1,86	1,77	0,08	1,71	1,82
150	1,77	1,71	1,72	1,75	1,89	1,87	1,88	1,90	1,81	0,08	1,76	1,87
170	1,85	1,82	1,82	1,82	1,96	1,96	1,90	1,99	1,89	0,07	1,84	1,94
190	1,90	1,86	1,88	1,89	2,04	2,00	2,04	2,03	1,95	0,08	1,90	2,01

Tabela 3 – Diâmetros da área de contato das hemiesferas A1 e A2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.

Massa por esfera [g]	Diâmetro da área de contato [mm]								Média	Des. Pad. (σ)	Intervalo de Confiança (95%)	
	B1				B2						Limite Inf.	Limite Sup.
15	1,14	1,15	1,15	1,16	1,26	1,14	1,25	1,26	1,19	0,06	1,15	1,23
20	1,23	1,23	1,22	1,26	1,27	1,19	1,30	1,29	1,25	0,04	1,22	1,28
25	1,30	1,32	1,30	1,31	1,37	1,30	1,36	1,38	1,33	0,03	1,31	1,35
30	1,44	1,40	1,41	1,42	1,49	1,42	1,47	1,45	1,44	0,03	1,42	1,46
35	1,47	1,45	1,44	1,48	1,56	1,49	1,52	1,58	1,50	0,05	1,46	1,53
40	1,58	1,53	1,52	1,55	1,62	1,55	1,59	1,63	1,57	0,04	1,54	1,60
50	1,66	1,63	1,62	1,65	1,75	1,64	1,68	1,71	1,67	0,05	1,64	1,70
60	1,80	1,78	1,77	1,81	1,86	1,78	1,84	1,84	1,81	0,03	1,79	1,83
70	1,89	1,86	1,85	1,85	1,95	1,88	2,01	1,97	1,91	0,06	1,86	1,95
80	1,96	1,92	1,90	1,97	2,08	1,99	2,04	2,05	1,99	0,06	1,94	2,03
90	2,05	2,03	2,04	2,07	2,19	2,10	2,14	2,16	2,10	0,06	2,06	2,14
110	2,18	2,15	2,14	2,19	2,30	2,21	2,23	2,29	2,21	0,06	2,17	2,25
130	2,32	2,30	2,27	2,32	2,40	2,30	2,33	2,41	2,33	0,05	2,30	2,36
150	2,44	2,40	2,40	2,47	2,56	2,47	2,48	2,53	2,47	0,06	2,43	2,51
170	2,49	2,47	2,45	2,55	2,73	2,62	2,66	2,71	2,58	0,11	2,51	2,66
190	2,67	2,66	2,60	2,74	2,79	2,68	2,70	2,74	2,70	0,06	2,66	2,74

Tabela 4 – Diâmetros da área de contato das hemiesferas B1 e B2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.

Massa por esfera [g]	Diâmetro da área de contato [mm]								Média	Des. Pad. (σ)	Intervalo de Confiança (95%)	
	C1				C2						Limite Inf.	Limite Sup.
15	1,56	1,59	1,55	1,53	1,71	1,70	1,74	1,66	1,63	0,08	1,57	1,69
20	1,60	1,62	1,60	1,55	1,74	1,75	1,77	1,70	1,67	0,08	1,61	1,72
25	1,64	1,67	1,68	1,62	1,77	1,81	1,82	1,79	1,73	0,08	1,67	1,78
30	1,68	1,74	1,75	1,67	1,85	1,82	1,89	1,85	1,78	0,08	1,73	1,84
35	1,81	1,84	1,85	1,79	1,93	1,92	1,90	1,92	1,87	0,05	1,83	1,91
40	1,88	1,95	1,96	1,88	1,99	2,01	2,00	1,99	1,96	0,05	1,92	1,99
50	2,05	2,07	2,10	1,99	2,07	2,12	2,12	2,08	2,08	0,04	2,04	2,11
60	2,19	2,21	2,23	2,18	2,23	2,25	2,25	2,27	2,23	0,03	2,20	2,25
70	2,32	2,34	2,37	2,30	2,37	2,38	2,40	2,34	2,35	0,03	2,33	2,38
80	2,42	2,48	2,47	2,42	2,49	2,47	2,51	2,45	2,46	0,03	2,44	2,48
90	2,59	2,51	2,53	2,56	2,68	2,66	2,73	2,63	2,61	0,08	2,56	2,66
110	2,73	2,77	2,78	2,74	2,82	2,79	2,86	2,79	2,79	0,04	2,76	2,82
130	2,93	2,99	3,01	2,95	2,93	2,92	2,97	2,89	2,95	0,04	2,92	2,98
150	3,01	3,05	3,11	3,04	3,03	3,07	3,10	3,01	3,05	0,04	3,03	3,08
170	3,16	3,18	3,25	3,16	3,22	3,16	3,25	3,15	3,19	0,04	3,16	3,22
190	3,29	3,34	3,36	3,32	3,44	3,42	3,52	3,48	3,40	0,08	3,34	3,45

Tabela 5 – Diâmetros da área de contato das hemiesferas C1 e C2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.

Massa por esfera [g]	Diâmetro da área de contato [mm]								Média	Des. Pad. (σ)	Intervalo de Confiança (95%)	
	D1				D2						Limite Inf.	Limite Sup.
15	1,95	2,13	2,05	2,03	2,01	2,09	1,99	2,08	2,04	0,06	2,00	2,08
20	2,00	2,18	2,08	2,09	2,03	2,14	2,03	2,09	2,08	0,06	2,04	2,12
25	2,06	2,23	2,12	2,16	2,08	2,18	2,08	2,16	2,13	0,06	2,09	2,17
30	2,19	2,30	2,21	2,25	2,18	2,19	2,12	2,20	2,21	0,05	2,17	2,24
35	2,22	2,37	2,26	2,30	2,29	2,31	2,22	2,28	2,28	0,05	2,25	2,31
40	2,27	2,38	2,28	2,32	2,38	2,40	2,29	2,37	2,34	0,05	2,30	2,37
50	2,43	2,58	2,46	2,45	2,55	2,53	2,48	2,55	2,50	0,06	2,46	2,54
60	2,58	2,63	2,58	2,60	2,75	2,76	2,68	2,77	2,67	0,08	2,61	2,73
70	2,64	2,71	2,65	2,63	2,84	2,83	2,78	2,83	2,74	0,09	2,68	2,80
80	2,78	2,88	2,78	2,83	3,03	3,01	2,98	3,03	2,91	0,11	2,84	2,99
90	2,91	2,97	2,93	2,96	3,12	3,09	3,05	3,08	3,01	0,08	2,96	3,07
110	3,11	3,17	3,13	3,18	3,19	3,14	3,16	3,18	3,16	0,03	3,14	3,18
130	3,33	3,36	3,33	3,38	3,41	3,31	3,33	3,34	3,35	0,03	3,32	3,37
150	3,45	3,51	3,43	3,52	3,63	3,63	3,58	3,57	3,54	0,08	3,49	3,59
170	3,65	3,80	3,71	3,77	3,80	3,75	3,73	3,71	3,74	0,05	3,70	3,77
190	3,76	3,88	3,82	3,87	3,92	3,84	3,83	3,77	3,83	0,05	3,80	3,87

Tabela 6 – Diâmetros da área de contato das hemisferas D1 e D2, diâmetro médio, desvio padrão e intervalo de confiança.

Figura 24 – Variação do diâmetro médio de contato em função do carregamento aplicado, com a representação dos respectivos intervalos de confiança 95%.

Figura 25 – Variação da área de contato em função do carregamento aplicado, com a representação dos respectivos intervalos de confiança 95%.

Para todas as borrachas a área de contato aumentou com o aumento do carregamento. Na Figura 24 e Figura 25 fica evidente a diferença entre a resposta ao carregamento em função das propriedades do material. As hemiesferas que possuem menor módulo de elasticidade apresentam a maior área de contato para um mesmo carregamento. Nota-se ainda, que as áreas de contato foram tanto maiores quanto menores as durezas das borrachas. Não foi possível nesses experimentos, correlacionar os valores de Tan Delta com as áreas finais de contato borracha-vidro. Observa-se ainda, na Figura 24 e na Figura 25, que a taxa de aumento da área de contato foi maior para a borracha de menor módulo e menor dureza, enquanto que esta taxa de aumento da área foi menor para a borracha de maior módulo e maior dureza.

A correlação entre aumento da área e módulo de elasticidade era esperada uma vez que na formulação da área de contato (equações 7 e 13), esta é a propriedade considerada. A dureza não foi considerada na literatura como fator relacionado à área de contato, porém, nos experimentos dessa dissertação, essa

propriedade mostrou uma correlação inversamente proporcional e com tendência linear da variação da área de contato em função do carregamento.

A dureza, conforme definição do ASM Handbook, pode ser interpretada como uma função da tensão necessária para produzir deformação na superfície do material. Dessa maneira, os materiais que possuem maior dureza, apresentarão menor área de contato.

Uma discussão mais detalhada da variação de área com a carga será feita no item 4.1.1 mediante a comparação dos resultados com as formulações propostas por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).

As Figura 26 à Figura 33 mostram a variação de área nos experimentos em função do carregamento aplicado. É possível observar uma pequena ovalização nas imagens devido a imagem ter sido registrada pela lente direita da lupa NIKON.

Figura 26 – Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera A 1 (enchimento).

Figura 27 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera A 2 (enchimento).

Figura 28 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera B 1 (rodagem).

Figura 29 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera B 2 (rodagem).

Figura 30 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera C 1 (lateral).

Figura 31 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera C 2 (lateral).

Figura 32 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera D 1 (estaque).

Figura 33 - Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesfera D 2 (estanque).

4.1.1 Discussão dos resultados frente aos modelos de Hertz e Johnson, Kendall e Roberts

Para a comparação dos resultados experimentais dessa dissertação com a estimativa das formulações feitas por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971), empregaram-se os seguintes valores: energia livre de superfície (γ) = $35 \text{ erg/cm}^2 = 35 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ (por superfície); coeficiente de Poisson = 0,5; Raio (R) da hemiesfera = 15 mm; módulo de elasticidade (E) igual ao da hemiesfera usada nos experimentos, conforme Tabela 7.

Os resultados para a borracha A (enchimento), com módulo de elasticidade (E) 16,8 MPa são mostrados na Tabela 7 e Figura 34; para a borracha B (rodagem), com módulo de elasticidade (E) de 5,77 MPa na Tabela 7 e Figura 35; para a borracha C (lateral), com módulo de elasticidade (E) de 5,42 MPa, na Tabela 7 e Figura 36 e, para a borracha D (estanque), com módulo de elasticidade (E) de 2,64 MPa na Tabela 7 e Figura 37.

Massa aplicada [g]	Diâmetro de contato [mm ²]											
	E = 16,8 MPa			E = 5,77 MPa			E = 5,42 MPa			E = 2,64 MPa		
	A	Hertz	JKR	B	Hertz	JKR	C	Hertz	JKR	D	Hertz	JKR
10	-	0,75	0,87	-	1,07	1,24	-	1,09	1,27	-	1,39	1,61
15	0,98	0,86	0,97	1,19	1,22	1,38	1,63	1,25	1,41	2,04	1,59	1,73
20	1,01	0,94	1,05	1,25	1,35	1,50	1,67	1,37	1,53	2,08	1,75	1,88
25	1,07	1,02	1,12	1,33	1,45	1,59	1,73	1,48	1,63	2,13	1,88	2,01
30	1,11	1,08	1,18	1,44	1,54	1,68	1,78	1,57	1,72	2,21	2,00	2,13
35	1,18	1,14	1,23	1,50	1,62	1,76	1,87	1,66	1,80	2,28	2,11	2,23
40	1,24	1,19	1,28	1,57	1,70	1,83	1,96	1,73	1,87	2,34	2,20	2,32
50	1,36	1,28	1,37	1,67	1,83	1,95	2,08	1,87	2,00	2,50	2,37	2,49
60	1,40	1,36	1,45	1,81	1,94	2,06	2,23	1,98	2,11	2,67	2,52	2,63
70	1,46	1,43	1,52	1,91	2,04	2,16	2,35	2,09	2,21	2,74	2,65	2,76
80	1,52	1,50	1,58	1,99	2,14	2,25	2,46	2,18	2,30	2,91	2,77	2,88
90	1,58	1,56	1,64	2,10	2,22	2,34	2,61	2,27	2,39	3,01	2,88	2,99
110	1,66	1,66	1,74	2,21	2,38	2,49	2,79	2,43	2,54	3,16	3,08	3,18
130	1,77	1,76	1,83	2,33	2,51	2,62	2,95	2,57	2,67	3,35	3,26	3,36
150	1,81	1,85	1,92	2,47	2,64	2,74	3,05	2,69	2,80	3,54	3,42	3,51
170	1,89	1,92	2,00	2,58	2,75	2,85	3,19	2,81	2,91	3,74	3,57	3,66
190	1,95	2,00	2,07	2,70	2,85	2,95	3,40	2,91	3,01	3,83	3,70	3,79

Tabela 7 – Diâmetro médio de contato entre as hemiesferas de borracha (A, B, C, D) contra uma superfície de vidro e cálculo dos diâmetros de contato utilizando as formulações de Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).

Figura 34 – Diâmetro de contato das hemiesferas A em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).

Figura 35 – Diâmetro de contato das hemiesferas B em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).

Figura 36 – Diâmetro de contato das hemiesferas C em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).

Figura 37 – Diâmetro de contato das hemiesferas D em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).

Com os resultados, verifica-se que para materiais de maior módulo de elasticidade e maior dureza (compostos A e B), a área de contato aproxima-se da formulação proposta por Hertz (1896), nos carregamentos utilizados.

Para carregamentos abaixo de 35 g, nos materiais de menor módulo de elasticidade e menor dureza (compostos C e D), o diâmetro de contato não varia linearmente e se aproxima das estimativas de Johnson, Kendall e Roberts (1971). Nesse modelo, a dureza não é levada em consideração na formulação para estimativa do diâmetro de contato.

Os experimentos de Johnson, Kendall e Roberts (1971) foram realizados com uma borracha de módulo de elasticidade de 0,8 MPa, o que permitiria que a energia de superfície conseguisse deformar o material em uma proporção muito maior que para os módulos de elasticidade maiores, como os usados nessa dissertação. No entanto, os diâmetros encontrados nos experimentos estão acima dos previstos por esta estimativa, indicando que a energia de superfície utilizada para o cálculo deve

estar abaixo do valor real de cada borracha e que provavelmente outras forças também estão influenciando o contato.

Realizando uma análise de sensibilidade em relação à energia de superfície, ou seja, utilizando os mesmos parâmetros e variando-se apenas o valor de energia livre de superfície de 20 erg/cm² a 50 erg/cm², observou-se que os resultados variaram muito pouco (no máximo 0,1 mm no diâmetro) e apenas a carregamentos próximos a zero, indicando que a variação de energia livre de superfície nesse nível (20 a 50 erg/cm²) irá influenciar pouco a variação da área de contato nas faixas de carregamentos utilizada.

4.2 ADESÃO

Neste conjunto de resultados determinou-se a força necessária para separar as hemiesferas de borracha da superfície de vidro. Os resultados foram comparados com os experimentos de adesão de Johnson, Kendall e Roberts (1971), Roberts e Othman (1976), Briggs e Briscoe (1979), entre outros.

4.2.1 Força de separação

A Tabela 8 a seguir mostra a força necessária para separar as hemiesferas de borracha da superfície de vidro, onde o sinal negativo indica que foi necessário aplicar força de tração para separar as superfícies em contato.

Hemiesferas		Medições Massa para separação [g]			Módulo de Elasticidade	Dureza	Tan δ
		1	2	3	MPa	Shore A	-
Enchimento	A	-0,5	-1,0	-1,0	16,8	87	0,132
Rodagem	B	-3,5	-4,5	-4,0	5,77	68	0,158
Lateral	C	-6,5	-6,0	-8,0	5,42	57	0,111
Estanque	D	-179,0	-188,0	-184,0	2,64	44	0,277

Tabela 8 – Força de separação das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro.

Utilizando a formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971) para estimar a energia de separação (γ) entre as superfícies em contato para os quatro compostos, obtiveram-se:

Composto A (enchimento):	$\gamma = 115 \text{ erg/cm}^2$	=	$115 \times 10^{-3} \text{ N/m}$
Composto B (rodagem):	$\gamma = 555 \text{ erg/cm}^2$	=	$555 \times 10^{-3} \text{ N/m}$
Composto C (lateral):	$\gamma = 950 \text{ erg/cm}^2$	=	$950 \times 10^{-3} \text{ N/m}$
Composto D (estanque):	$\gamma = 25.490 \text{ erg/cm}^2$	=	$25.490 \times 10^{-3} \text{ N/m}$

Os valores de energia de separação (γ) encontrados para os compostos A, B e C, estão coerentes com estudos realizados por Briggs e Briscoe (1979), que encontraram valores da ordem de 100 erg/cm^2 a 5.000 erg/cm^2 dependendo do carregamento aplicado e do composto utilizado. Também estão coerentes com os estudos de Roberts e Thomas (1974), que encontraram valores de 180 erg/cm^2 no contato entre hemiesferas de borracha natural contra uma superfície de vidro. Já o composto D apresentou a energia de separação muito elevada em comparação com esses estudos.

Roberts (1976) estudou a energia de separação de hemiesferas de borracha contra uma superfície de vidro, e encontrou que a energia de separação de uma borracha butílica é da ordem de 15.000 erg/cm^2 . A borracha butílica é o principal componente na composição do estanque (composto D), que também emprega uma diversidade de outros componentes para aumentar a adesão do mesmo, o que explica o elevado valor de energia de separação (γ) encontrado.

O valor de energia de superfície para vidros é da ordem de 28 erg/cm^2 e para borrachas é da ordem de 40 erg/cm^2 . Somando os valores, tem-se uma energia de superfície de 68 erg/cm^2 . Porém, com os resultados obtidos de energia de separação (γ), fica evidente que não somente a energia de superfície está influenciando o contato, mas também outras forças estão presentes, como energia eletrostática, forças de Van der Waals, forças viscosas, entre outras.

Apesar dos estudos de Briscoe, Arvanitaki, Adams e Johnson (2001) e outros pesquisadores, mostrarem a dependência da força de separação em relação às

forças viscosas dos materiais, nos experimentos realizados nessa dissertação não foi possível estabelecer uma relação entre esses fatores, provavelmente devido à diferença na composição dos compostos utilizados.

Em materiais de alto módulo de elasticidade (por exemplo: composto A), as forças de adesão são vencidas pelo esforço gerado no retorno elástico (Johnson, 1957), fazendo com que a área de contato, após descarregamento, diminua consideravelmente e a energia de separação seja diminuída proporcionalmente. Para materiais de baixo módulo de elasticidade (por exemplo: compostos C e D), as forças de adesão são suficientemente fortes para segurar as superfícies unidas após a retirada do carregamento, resultando em uma energia de separação mais elevada.

Observa-se nos experimentos, que a dureza apresenta uma relação inversamente proporcional à força de separação das superfícies, porém, a dureza não é uma propriedade considerada na literatura estudada.

4.3 EFEITO DO TEMPO NA ÁREA DE CONTATO

O objetivo desse estudo é analisar o efeito do tempo de exposição ao carregamento na variação da área de contato de hemiesferas de borracha contra uma superfície de vidro. O resultado desse estudo possibilitará o entendimento do comportamento viscoelástico de borrachas quando submetidas a carregamentos constantes em tempos prolongados. As medidas dos diâmetros de contato em função do tempo de exposição ao carregamento estão nas Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Tempo [min]	Carrega mento [g]	Diâmetro da área de contato [mm]				Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	
		Composto A						Limite Inferior	Limite Superior
0	83,3	1,48	1,48	1,46	1,48	1,48	0,01	1,47	1,48
2		1,50	1,50	1,48	1,51	1,50	0,01	1,49	1,51
4		1,53	1,52	1,50	1,53	1,52	0,01	1,51	1,53
6		1,55	1,54	1,52	1,56	1,54	0,02	1,53	1,56
8		1,56	1,54	1,52	1,56	1,55	0,02	1,53	1,56
10		1,57	1,55	1,51	1,57	1,55	0,03	1,53	1,57
12		1,57	1,55	1,51	1,57	1,55	0,03	1,53	1,57
14		1,57	1,55	1,51	1,57	1,55	0,03	1,53	1,57
16		1,57	1,55	1,51	1,57	1,55	0,03	1,53	1,57
18	15,0	1,18	1,13	1,12	1,16	1,14	0,03	1,12	1,16
20		1,16	1,10	1,07	1,13	1,11	0,04	1,09	1,14
22		1,13	1,08	1,04	1,10	1,09	0,04	1,06	1,11
24		1,10	1,06	1,03	1,10	1,07	0,04	1,05	1,10
26		1,09	1,06	1,03	1,08	1,06	0,03	1,04	1,08
28		1,09	1,05	1,02	1,08	1,06	0,03	1,04	1,08
30		1,09	1,05	1,02	1,08	1,06	0,03	1,04	1,08
32		1,09	1,05	1,02	1,08	1,06	0,03	1,04	1,08
34		1,09	1,05	1,02	1,08	1,06	0,03	1,04	1,08

Tabela 9 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera A em função do tempo de exposição.

Tempo [min]	Carregamento [g]	Diâmetro da área de contato [mm]				Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	
		Composto B						Limite Inferior	Limite Superior
0	83,3	1,97	1,98	1,95	1,96	1,96	0,01	1,96	1,97
2		2,08	2,02	2,07	2,08	2,06	0,03	2,04	2,08
4		2,16	2,07	2,13	2,10	2,11	0,04	2,09	2,14
6		2,17	2,10	2,14	2,11	2,13	0,03	2,11	2,15
8		2,18	2,10	2,14	2,13	2,14	0,03	2,12	2,16
10		2,18	2,11	2,15	2,15	2,15	0,03	2,13	2,17
12		2,18	2,11	2,15	2,15	2,15	0,03	2,13	2,17
14		2,18	2,11	2,15	2,15	2,15	0,03	2,13	2,17
16		2,18	2,11	2,15	2,15	2,15	0,03	2,13	2,17
18	15,0	1,68	1,66	1,65	1,63	1,65	0,02	1,64	1,67
20		1,63	1,63	1,60	1,58	1,61	0,03	1,59	1,63
22		1,59	1,55	1,56	1,54	1,56	0,02	1,55	1,57
24		1,56	1,53	1,54	1,51	1,54	0,02	1,52	1,55
26		1,55	1,52	1,54	1,51	1,53	0,02	1,52	1,54
28		1,55	1,52	1,54	1,50	1,53	0,02	1,51	1,54
30		1,55	1,51	1,54	1,50	1,53	0,02	1,51	1,54
32		1,55	1,51	1,54	1,50	1,53	0,02	1,51	1,54
34		1,55	1,51	1,54	1,50	1,53	0,02	1,51	1,54

Tabela 10 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera B em função do tempo de exposição.

Tempo [min]	Carrega mento [g]	Diâmetro da área de contato [mm]				Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	
		Composto C						Limite Inferior	Limite Superior
0	83,3	2,47	2,48	2,52	2,49	2,49	0,02	2,48	2,51
2		2,52	2,51	2,57	2,54	2,53	0,03	2,52	2,55
4		2,53	2,55	2,60	2,56	2,56	0,03	2,54	2,58
6		2,55	2,57	2,62	2,58	2,58	0,03	2,56	2,60
8		2,56	2,57	2,63	2,58	2,58	0,03	2,56	2,61
10		2,56	2,57	2,63	2,58	2,58	0,03	2,56	2,61
12		2,56	2,58	2,63	2,58	2,59	0,03	2,57	2,61
14		2,56	2,58	2,63	2,58	2,59	0,03	2,57	2,61
16		2,56	2,58	2,63	2,58	2,59	0,03	2,57	2,61
18	15,0	1,98	2,07	2,05	1,99	2,02	0,05	1,99	2,05
20		1,93	2,02	2,00	1,93	1,97	0,05	1,94	2,01
22		1,91	2,00	1,99	1,91	1,95	0,05	1,92	1,98
24		1,91	1,99	1,98	1,91	1,95	0,04	1,91	1,98
26		1,91	1,98	1,98	1,91	1,94	0,04	1,91	1,97
28		1,91	1,98	1,98	1,90	1,94	0,04	1,91	1,97
30		1,91	1,98	1,98	1,90	1,94	0,04	1,91	1,97
32		1,91	1,98	1,98	1,90	1,94	0,04	1,91	1,97
34		1,91	1,98	1,98	1,90	1,94	0,04	1,91	1,97

Tabela 11 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera C em função do tempo de exposição.

Tempo [min]	Carrega mento [g]	Diâmetro da área de contato [mm]				Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	
		Composto D						Limite Inferior	Limite Superior
0	83,3	2,93	2,91	2,92	2,93	2,92	0,01	2,91	2,93
2		3,09	3,06	3,07	3,09	3,08	0,02	3,07	3,09
4		3,17	3,13	3,13	3,17	3,15	0,02	3,13	3,16
6		3,21	3,18	3,18	3,19	3,19	0,01	3,18	3,20
8		3,23	3,19	3,18	3,20	3,20	0,02	3,19	3,22
10		3,25	3,21	3,21	3,21	3,22	0,02	3,20	3,23
12		3,27	3,23	3,23	3,23	3,24	0,02	3,22	3,25
14		3,27	3,23	3,23	3,23	3,24	0,02	3,22	3,25
16		3,27	3,23	3,23	3,23	3,24	0,02	3,22	3,25
18	15,0	3,07	2,99	3,03	3,03	3,03	0,03	3,01	3,05
20		3,00	2,96	2,98	2,99	2,98	0,02	2,97	3,00
22		2,98	2,92	2,93	2,93	2,94	0,03	2,92	2,96
24		2,93	2,89	2,90	2,91	2,91	0,02	2,90	2,92
26		2,89	2,88	2,89	2,89	2,89	0,01	2,88	2,89
28		2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	0,00	2,88	2,88
30		2,88	2,87	2,88	2,88	2,88	0,01	2,87	2,88
32		2,88	2,87	2,88	2,88	2,88	0,01	2,87	2,88
34		2,88	2,87	2,88	2,88	2,88	0,01	2,87	2,88

Tabela 12 – Diâmetros da área de contato da hemiesfera D em função do tempo de exposição.

A seguir, as Figura 38 à Figura 41 mostram a variação da área de contato em função do tempo de exposição.

Figura 38 – Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera A. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.

Figura 39 – Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera B. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.

Figura 40 – Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera C. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.

Figura 41 - Variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento para a hemiesfera D. Carregamento de 83,3 g até 16 min e carregamento de 15 g até 34 min.

Observa-se na Figura 42 e Figura 43, as respostas ao carregamento em função das propriedades do material/composto utilizado e do tempo de exposição.

Figura 42 - Variação do diâmetro de contato das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro em função do tempo de exposição ao carregamento.

Figura 43 - Variação da área de contato das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro em função do tempo de exposição ao carregamento.

Nas Tabela 13 e Tabela 14, mostram-se as variações percentuais da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento e ao descarregamento, respectivamente.

		Área inicial [mm ²]	Área final [mm ²]	% Variação de Área	Tan δ
Enchimento	A	1,71	1,88	10	0,132
Rodagem	B	3,03	3,63	20	0,158
Lateral	C	4,87	5,26	8	0,111
Estanque	D	6,71	8,23	23	0,277

Tabela 13 – Variação da área de contato do momento de aplicação de carga até o equilíbrio da área de contato.

A variação de área no carregamento foi maior (23%) para o composto D, de maior Tan δ (0,277) e foi menor (8%) para o composto A, de menor Tan δ (0,111). Esse resultado mostra correlação direta entre módulo viscoso do material e tempo de resposta ao carregamento. Quanto maior o comportamento viscoso do material, mais pronunciada será a variação da área de contato em função do tempo de exposição.

Para compostos de menor Tan δ , a área de contato atinge o patamar de equilíbrio em menor tempo. Os compostos A (Tan δ = 0,132) e C (Tan δ = 0,111) o patamar de equilíbrio foi estabelecido em aproximadamente 8 minutos, apresentando uma variação de área de 10% e 8% respectivamente. Já para os compostos de maior Tan δ , atingir o patamar de equilíbrio leva mais tempo. O composto B (Tan δ = 0,158) levou aproximadamente 12 minutos para atingir o equilíbrio e apresentou uma variação de área de contato de 20%, e o composto D, de maior Tan δ (0,277) levou 14 minutos para atingir o equilíbrio com uma variação de área de 23%.

Porém, o Tan δ não é a única propriedade que influenciou o resultado em função do tempo de exposição, pois a correlação de variação de área e Tan δ não foi linear. A diferença entre os valores de Tan δ dos compostos C, B e A é muito próximo (A-C = 0,021; B-A = 0,026), mas a diferença de variação de área foi 2% e 10%, respectivamente.

Para poder comparar apenas a influência do $\tan \delta$ e/ou de outras propriedades, isoladamente, seria necessário que apenas uma das propriedades do material fosse variável. Nos experimentos realizados nesse trabalho não foi possível observar a influência isolada de uma propriedade.

O comportamento da área de contato no descarregamento não apresenta a mesma relação com o $\tan \delta$.

		Área inicial [mm ²]	Área final [mm ²]	% Variação de Área	$\tan \delta$
Enchimento	A	1,03	0,88	16	0,132
Rodagem	B	2,15	1,83	18	0,158
Lateral	C	3,20	2,96	8	0,111
Estanque	D	7,21	6,49	11	0,277

Tabela 14 – Variação da área de contato no descarregamento. A área inicial é a medição no momento de retirada da carga e a área final é o valor após atingido o equilíbrio.

A variação de área de contato após descarregamento não é proporcional ao $\tan \delta$, pois o composto D, de maior $\tan \delta$ (0,277) apresentou a segunda menor variação de área de contato (11%).

Porém, quanto maior o $\tan \delta$, menor é a diferença entre a área inicial carregada com 250 g e a área final encontrada com 45 g. O “degrau” gerado no descarregamento fica muito mais evidente para materiais de menor $\tan \delta$, como por exemplo, a curva do material C (lateral) que possui $\tan \delta = 0,111$. Esse comportamento pode ser explicado pela força de adesão entre as superfícies que as mantém unidas após descarregamento. A energia de separação irá aumentar devido ao aumento de área de contato, aumento da energia eletrostática e devido à energia livre de superfície.

Os resultados também reafirmam que quanto maior o módulo de elasticidade e maior a dureza do material, menor será a área de contato. Essa relação de aumento, entretanto, não é linear, mas apresenta correlação direta.

Com os experimentos realizados nesse trabalho, não é possível concluir qual é o principal fator de influência na variação da área de contato no descarregamento. É possível que as forças de adesão (eletrostática, Van der Waals, energia de superfície e histerese na adesão) associadas às propriedades dos materiais utilizados, estejam contribuindo para que não seja possível estabelecer uma relação de dependência entre os resultados obtidos nesse estudo.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o estudo do contato de hemiesferas de borracha contra uma superfície de vidro e os resultados foram comparados com trabalhos anteriores.

A formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971) é válida para o contato estático de hemiesferas de borracha contra uma superfície de vidro, onde a área de contato a baixos carregamentos é bem superior à prevista pelo modelo de Hertz (1896). Isso é devido às forças de adesão que exercem grande influência a baixos carregamentos, principalmente quando combinado com baixo módulo de elasticidade do material, pois a força é capaz de deformar a superfície e formar novas unidades de área. Quanto maior o módulo de elasticidade do material, menor será a faixa de influência das forças de adesão.

A dureza das hemiesferas de borracha é inversamente proporcional à variação de área de contato, porém, na literatura estudada esta propriedade não é considerada para a estimativa da área de contato. Quanto maior a dureza da borracha, menor é a área de contato para um mesmo carregamento de referência.

A energia de separação (γ), estimada a partir da formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971), depende de 6 fatores principais: força normal aplicada, tempo de exposição ao carregamento, energia de superfície, energia eletrostática, forças de Van der Waals e forças viscosas. O aumento da energia de superfície em função da força normal e do tempo de exposição está associado ao aumento de área de contato entre as superfícies.

A variação da área de contato em função do tempo de exposição mostrou ter grande representatividade para materiais viscoelásticos. Quanto maior o $\tan \delta$, maior será a variação da área de contato em função do tempo de exposição ao carregamento. Porém, para o descarregamento os resultados são dependentes de outros fatores, os quais não puderam ser estudados separadamente.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram usados equipamentos que não permitiam a visualização da distribuição dos esforços na superfície de contato. Fica como sugestão para um próximo trabalho a utilização de equipamentos que permitam a medição da distribuição de pressão da área de contato. A distribuição de pressão possibilitaria prever o desgaste da área de contato, no caso de contato dinâmico.

A área de contato varia devido a vários fatores, porém não foi possível estudá-los separadamente. A influência da dureza e módulo de elasticidade pode ser estudada separadamente, assim como o $\tan \delta$ e o módulo de elasticidade.

Foi possível observar o comportamento de histerese no descarregamento, porém seus efeitos e contribuições para o aumento da área de contato não foram estudados separadamente. O estudo das contribuições relativas podem trazer grandes contribuições para o entendimento do contato.

Roberts e Othman (1977) descrevem a variação da energia de separação em função da força normal e tempo de exposição, porém não descreveram sobre a variação da adesão em função da temperatura. Portanto, um estudo que traria contribuições é o estudo da variação da energia de separação em diversas temperaturas (por exemplo: abaixo da T_g e bem acima da temperatura ambiente).

Também fica como sugestão, o estudo da variação da área de contato sob influência da temperatura.

ANEXO 1

Limpeza de materiais

Em seu artigo, Langmuir (1919) trata da limpeza de superfícies e em uma das abordagens, faz a experiência e demonstra a influência de ácidos oléicos adsorvidos em uma superfície de vidro.

Langmuir (1919) constatou, por meio de ensaios de deslizamento de uma superfície de vidro sobre outra, que quando a superfície estava completamente limpa (sem adsorção de ácidos oléicos) o ângulo de deslizamento (em relação ao plano horizontal) era da ordem de 50° a 60° . Porém, após um pequeno período de exposição à atmosfera ambiente, esse ângulo de deslizamento caía rapidamente devido à contaminação da superfície. Após 3 minutos o ângulo de deslizamento cai para 45° , após 20 minutos 40° , após 2 horas 22° . E no caso de haver algum ácido oléico adsorvido na superfície, o ângulo de deslizamento fica na ordem de 6° a 10° .

O método adotado por Langmuir (1919) para a limpeza de vidros foi: o vidro foi lavado com água e sabão, aquecido em uma mistura concentrada de ácido sulfúrico e óxido crômico, enxaguados em água corrente e seco sobre uma chama de queimador Bico Bunsen. Esse processo de limpeza, de acordo com Langmuir (1919), foi o mais eficaz encontrado para a limpeza de vidros para a remoção de substâncias adsorvidas na superfície.

Foi observado também nos experimentos de Langmuir (1919), que se a superfície de vidro estiver com óleo parafínico puro adsorvido em sua superfície, este pode ser limpo de maneira diferente de ácidos oléicos. Os óleos parafínicos na presença de água, destacam-se da superfície e a água passa a molhar a superfície, deixando-a livre de óleo adsorvido.

Para verificar se a superfície está completamente limpa (sem ácidos oléicos e/ou óleos parafínicos adsorvidos) Langmuir (1919) descreve em seu artigo que se uma gota de água for colocada sobre a superfície limpa de um vidro, e este

inclinado, a gota de água correrá para o ponto mais baixo, deixando um filme fino de água por todo o percurso que for percorrido pela gota. Caso a superfície possua pequenas quantidades de ácidos oléicos adsorvido, não haverá a formação do filme fino de água no percurso percorrido pela gota de água.

Também é possível realizar o “teste do talco”, como Langmuir (1919) denomina, que é a imersão do vidro através de uma superfície de água onde uma pequena quantidade de talco foi depositada. Se ao imergir o vidro, o talco não for repelido da superfície, isso significa que a superfície está limpa, porém, na presença de pequenas quantidades de óleos adsorvidos é possível perceber que o talco é repelido do vidro.

No artigo de Johnson Kendall e Roberts (1971) não foi mencionado o procedimento de limpeza dos materiais utilizados em suas experiências. Já no artigo de Roberts e Othman (1977) a limpeza dos materiais é feita de diversas maneiras e temperaturas com álcool isopropílico e acetona.

O procedimento de limpeza das hemiesferas de borracha usando álcool isopropílico (Roberts e Othman 1977), inicialmente foi realizado à temperatura ambiente, mas mostrou-se ineficiente na remoção dos contaminantes. Diante disso (Roberts e Othman 1977), a limpeza foi realizada colocando-se as hemiesferas imersas em álcool isopropílico em ebulição (81,5 °C) durante 3,5 horas para uma limpeza mais profunda. Os experimentos foram refeitos após a limpeza usando esse procedimento e os resultados mostraram diminuição da variação da força de adesão em função do tempo de exposição ao carregamento. Porém, ainda assim, o tempo influenciou a força de adesão.

Durante a armazenagem das hemiesferas, Roberts e Othman (1977) notaram que mesmo em condições ideais, a superfície continha contaminantes. Após estudo, verificou-se que esses contaminantes eram provenientes do próprio material, partículas livres do interior do material. Para tentar limpar o material de forma a remover as partículas livres do interior do material, a limpeza em álcool isopropílico em ebulição foi realizado variando-se o tempo que as hemiesferas permaneciam em imersão, onde o tempo máximo usado foi de 3 dias.

A limpeza durante tempos mais longos permite que o álcool isopropílico remova as partículas livres (contaminantes) do interior do material. A conclusão desse estudo de limpeza foi que importantes contaminantes a serem considerados são os ingredientes livres que migram do interior do material para a superfície. Mesmo que o material seja limpo e armazenado de forma correta, contaminantes irão migrar do interior para a superfície do material. Tendo em vista essa migração de partículas, antes de qualquer experiência, os materiais devem ser limpos de forma a remover todos os contaminantes presentes na superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMSON, A. W. - **Physical chemistry of surfaces**, Londres: Interscience, 1967. 317 p.

ALNER, D. J. (Editor). **Aspects of adhesion**. Londres: University of London Press, 1971. Volume 6, 149 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1566:2009**: Terminologia de borrachas. 2009.

ANDERSON, A. E. et al. **Friction, Lubrication and Wear Technology**. ASM HANDBOOK. Volume 18. ASM International, 1992.

ANDERSON, A. E. et al. **Mechanical testing and evaluation**. ASM HANDBOOK. Volume 8. ASM International, 2000.

ARCHARD, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. **British Journal of Applied Physics**, Berkshire, 1953. Volume 24, número 8, p. 981.

ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 3ª edição. Oxford: Elsevier, 2005.

BHUSHAN, B. – **Introduction to Tribology**. Nova York: John Wiley and Sons, 2002.

BRIGGS, G. A. D.; BRISCOE, B. J. Surface roughness and the friction and adhesion of elastomers. **Wear**, Lausanne, p. 269, 1979.

BRISCOE, B. J.; ARVANITAKI, A.; ADAMS, M. J.; JOHNSON, S. A. The friction and adhesion of elastomers. **Tribology and Interface Engineering Series**, Londres, Volume 39, p.661, 2001.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BSI BS 3558**: Glossário de termos de borracha. 2001.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials Science and Engineering**. 7ª edição. Nova York: John Wiley and Sons, 2007.

CIULLO, P. A.; HEWITT, N. **The Rubber Formulary**. Nova York: Noyes Publications, 1999.

DERJAGUIN, B. V.; MULLER, V. M.; TOPOROV, YU. P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. **Journal of Colloid and Interface Science**, Moscow, 1975. Volume 53, número 2, p. 341.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4761/2**: Características geométricas das superfícies: termos, definições e símbolos. 1978.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4768/4777**: Determinação de parâmetros de rugosidade. 1990.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 53501**: Conceitos gerais de borrachas e elastômeros. 1980.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. Contact of normally flat surfaces. **Proc. R. Soc. London**, Connecticut, p. 300, 1966.

HARPER, C. A. (editor). **Handbook of Plastics, Elastomers and Composites**. 4ª edição. Massachusetts, 2004.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: Friction and Wear of Engineering Materials. Oxford 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1382**: Rubber Vocabulary. 5ª edição. 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3274**: Especificação geométrica do produto – textura de superfície: característica nominal de instrumentos de contato. 2ª edição. 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4288**: Especificação geométrica do produto – textura de superfície: regras e precedimentos para avaliação da superfície. 2ª edição. 1996.

JOHNSON, K. L. A Note on the Adhesion of Elastic Solids. **British Journal of Applied Physics**, Cambridge, 1957. Volume 9, p. 199.

JOHNSON, K. L.; KENDALL, K.; ROBERTS, A. D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. **Pro. R. Soc. Lond. A.**, Cambridge, p. 301, 1971.

LANGMUIR, I. **The Mechanism of the surface Phenomena of flotation**. July, 1919.

MAEDA, K.; BISMARCK, A.; BRISCOE, B. Effect of Bulk Deformation on Rubber Adhesion. **Wear**, Londres, p. 1016, 2007.

MOORE, D. F.; GEYER, W. A review of adhesion theories for elastomers. **Wear**, Lausanne, p. 113, 1972.

PERSSON, B. N. J. On the Theory of Rubber Friction. **Surface Science**, Jülich, p. 445, Dezembro. 1997.

PERSSON, B. N. J.; TOSATTI, E. Qualitative theory of rubber friction and wear. **Journal of Chemical Physics**, Jülich, 1999. Volume 112, número 4, p. 2021.

POCIUS A. V.; CHAUDHURY M. **Adhesion science and engineering – I: The mechanics of adhesion**. Nova York: Elsevier, 2002.

POCIUS A. V.; DILLARD D. A. **Adhesion science and engineering – II: Surfaces, chemistry and applications**. Nova York: Elsevier, 2002.

ROBERTS, A. D. Theories of dry rubber friction. **Tribology international**, Hertford, p. 75, 1976.

ROBERTS, A. D.; OTHMAN. A. B. Rubber adhesion and the dwell time effect. **Wear**, Hertford, p. 119, 1977.

ROBERTS, A. D.; THOMAS, A. G. The adhesion and friction of smooth rubber surfaces. **Wear**, p. 45, 1975.

TIMOSHENKO. **Theory of Elasticity**. New York: McGraw-Hill Book Co. Inc. 339 p.

TOMANIK, E. **Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2000.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of surface metrology**. Londres: Institute of Physics Publishing, 1994.

ZHANG, S. W. Tribology of Elastomers. **Tribology and interface engineering series, no. 47**. Oxford: Briscoe, B. J. (Editor), 2004.