



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **ESTUDO SOBRE A ÁREA DE HEMIESFERAS DE BORRACHA CONTRA UMA SUPERFÍCIE DE VIDRO**

**Renato Lucato Gimenez**  
**Amilton Sinatora**

GE Oil & Gas – Drilling and Production - Rodovia de Acesso João de Goes, 2300 - Jandira - SP, CEP: 06612-000 - Brasil. (renato\_gimenez@yahoo.com)

Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Mello Moraes, 2231. 05508-900 São Paulo, S.P. Brasil. (sinatora@usp.br)

***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:** Área de contato; Tempo de exposição; Adesão.*

## **1 INTRODUÇÃO**

Os elastômeros apresentam algumas características únicas, como por exemplo, deformação elástica, chegando a 1000%, baixo módulo de elasticidade em comparação com outras famílias de materiais, comportamento viscoelástico e baixa densidade, que fazem com que sejam muito utilizados em algumas aplicações, como por exemplo: pneus para bicicletas, veículos automotores, vedações, tubulações flexíveis, entre outros.

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 com o aumento do conhecimento nesta área.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Área 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 mm<sup>2</sup>.

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).

No contato, as asperezas se deformam elástica 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. 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 forças de adesão.

### 2.1.1 Fatores que afetam a área real de contato nos sólidos elásticos

Para a maioria dos sólidos elásticos, a área real de contato varia linearmente em função do carregamento aplicado e a resposta do sistema independe da área aparente de contato. O principal fator que afeta a área real de contato entre superfícies é a rugosidade superficial e o modelo mais divulgado é o de 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 rígida, lisa e plana. Os picos da superfície rugosa têm altura aleatória e se deformarão elasticamente quando carregados.

Neste modelo, a distribuição das alturas das asperezas segue uma distribuição estatística que pode ser descrita em função da densidade de probabilidade, onde 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:

$$\psi = \frac{E'}{H} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_s}{\beta}} \quad (1)$$

Onde, H é a dureza de indentação da superfície rugosa e  $\sigma_s$  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  $\beta$ . Para valores de  $\beta < 0,6$  a deformação plástica nas asperezas só ocorre com pressões nominais de contato muito altas. Já para valores de  $\beta > 1$ , a maioria das asperezas se deforma plasticamente mesmo sobre pressões nominais baixas. Mesmo para metais polidos,  $\beta$  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).

### 2.1.2 Fatores que afetam a área real de contato nos sólidos viscoelásticos

Para materiais viscoelásticos, a variação da área de contato não é linearmente dependente do carregamento. Em altos carregamentos a área real de contato se aproxima muito da área aparente, e para baixos carregamentos as forças de adesão irão influenciar fortemente. Se o módulo de elasticidade do material for suficientemente baixo e não houver 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 às forças de adesão.

É possível observar nas experiências feitas por Persson (1997 e 1999), que as forças de adesão podem 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.

Johnson, Kendall e Roberts (1971) descrevem a influência da energia de superfície entre os sólidos em contato, onde, para forças normais elevadas a contribuição das forças de adesão é pequena. Entretanto, quando o carregamento tende a zero, a importância da força de adesão aumenta. Energia de superfície é o trabalho necessário para criar uma unidade de área de uma nova superfície no corpo do material. (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.

Roberts e Thomas (1974), Robert e Othman (1976), Briscoe, Arvanitaki, Adams e Johnson (2001) e Briggs e Briscoe (1979), não consideram diretamente a energia eletrostática e as forças de Van der Waals. Esses pesquisadores consideram a energia de separação (*peel energy*,  $\gamma$ ,  $\text{mJ/m}^2 = \text{erg/cm}^2$ ) 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 ( $\gamma$ ) é igual à energia livre de superfície equivalente para a força de separação encontrada.

Os resultados de energia de separação encontrados por Roberts e Othman (1977) em função da variação da força normal aplicada, 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, as forças de adesão mantêm as superfícies unidas fazendo com que a energia para separar as superfícies seja maior.

Roberts e Othman (1977) também descrevem 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. Os resultados de energia de separação 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.

A energia de separação ( $\gamma$ ) 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, os valores registrados de força de separação entre as superfícies foi de aproximadamente -12 mN. Essa diferença nos resultados foi atribuída ao fenômeno de histerese na adesão.

## 2.2 Estimativa da área real de contato sem adesão

Na formulação de Hertz (1881 e 1896), o material e o raio das esferas não necessitam ser o mesmo, e no limite, uma esfera pode ser um plano.

Raio “a” da área de contato - Esfera / Plano (1881)

$$a^3 = \frac{3 \cdot w \cdot R}{4 \cdot E} \quad (2)$$

Raio “a” da área de contato (1896)

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

Onde: a – raio da área de contato [mm]    R, R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub> – raio das esferas [mm]    k<sub>1</sub> e k<sub>2</sub> – constante elástica  
v - constante de Poisson    E – módulo de elasticidade [N/mm<sup>2</sup>]    w – força normal aplicada [N]

Constante elástica do material:  $k = \frac{(1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \quad (4)$

Quando não há presença de carregamento, a equação de Hertz (1896) remete a um raio de contato igual a zero, Porém, na presença de forças de adesão ( $\gamma_r$ ,  $\gamma_g$  e  $\gamma_{rg}$ ), o raio “a” de contato é bem superior ao previsto pela equação de Hertz.

## 2.3 Estimativa da área real de contato com adesão

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.

No equilíbrio, o carregamento aparente de Hertz (1896) para se atingir a área real de contato para uma superfície de energia  $\gamma$  é P<sub>1</sub>, o qual é maior que P<sub>0</sub>. 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<sub>1</sub> de Hertz:

$$P_1 = P_0 + (3 \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R) + \sqrt{(6 \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R \cdot P_0) + (3 \cdot \gamma \cdot \pi \cdot R)^2} \quad (5)$$

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:

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

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  
 $\gamma$  – energia de superfície  $a$  – raio de contato

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (7) \quad R_1 \text{ e } R_2 \text{ – raio da esfera}$$

$$K = \frac{4}{3 \cdot \pi \cdot (k_1 + k_2)} \quad (8) \quad k_1 \text{ e } k_2 \text{ – constante elástica do material}$$

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

$$P = -\frac{3}{2} (\gamma \cdot \pi \cdot R) \quad (9)$$

### 3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é verificar se o modelo Johnson, Kendall e Roberts (1971) se aplica ao cálculo da área de contato de 4 tipos de borrachas contra vidro.

### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1 Aplicação da força

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 seus centros contra uma chapa de vidro com forma de um triângulo equilátero sobre as três hemiesferas. A massa inicial da experiência foi de 45 g (a massa da chapa de vidro). A aplicação de massa foram acréscimos de 15 g em 15 g até 120 g, de 30 g em 30 g até 270 g e de 60 g em 60 g até 570 g, 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. A deposição das massas foi feita sobre um balança MJ-3000 com sensibilidade de 0,1 g.

As áreas de contato borracha-vidro eram circulares e tiveram seus diâmetros medidos em fotografias feitas em lupa NIKON SMZ800, equipada com uma câmera digital NIKON DXM1200F. Para minimizar o efeito do tempo de exposição ao carregamento, a área de contato foi registrada 5 segundos após a aplicação do carregamento.

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. Este número de determinações foi também empregado nas demais etapas do estudo.

#### 4.2 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, onde o equilíbrio foi estabelecido pelos fios de tração da chapa. 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.

#### 4.3 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, como no estudo do efeito da força. A massa inicial total da experiência foi de 250 g, 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 e a partir do diâmetro médio, seu intervalo de confiança 95% e, então, calculada a área de contato.

#### 4.4 Materiais utilizados

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.).

**Tabela 1 – Hemiesferas utilizadas para as medições de área de contato.**

Material	Hemi esfera	Massa [g]	Ra [ $\mu\text{m}$ ] Rmax [ $\mu\text{m}$ ]	Diâmetro [mm]	E [Mpa]	Tan $\delta$	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					

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 ( $\delta$ ).

#### 4.5 Limpeza das hemiesferas e chapa de vidro

O método usado por Langmuir (1919) para a limpeza de ácidos oléicos 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). Após lavadas as superfícies foram enxaguadas em água corrente e então secas por meio de um secador.

O método adotado para a limpeza das superfícies mostrou-se eficaz na remoção de ácidos oléicos e óleos parafínicos adsorvidos na superfície dos materiais. Para essa avaliação, empregou-se o procedimento adotado por Langmuir (1919). Considerando os resultados de Roberts e Othman (1977) sobre o afloramento de partículas presentes no interior do material, todos os materiais foram limpos e secos momentos antes das experiências.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

### 5.1 Efeito da força aplicada na área de contato

Para todas as borrachas a área de contato aumentou com o aumento do carregamento. Na Figura 1 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, 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.

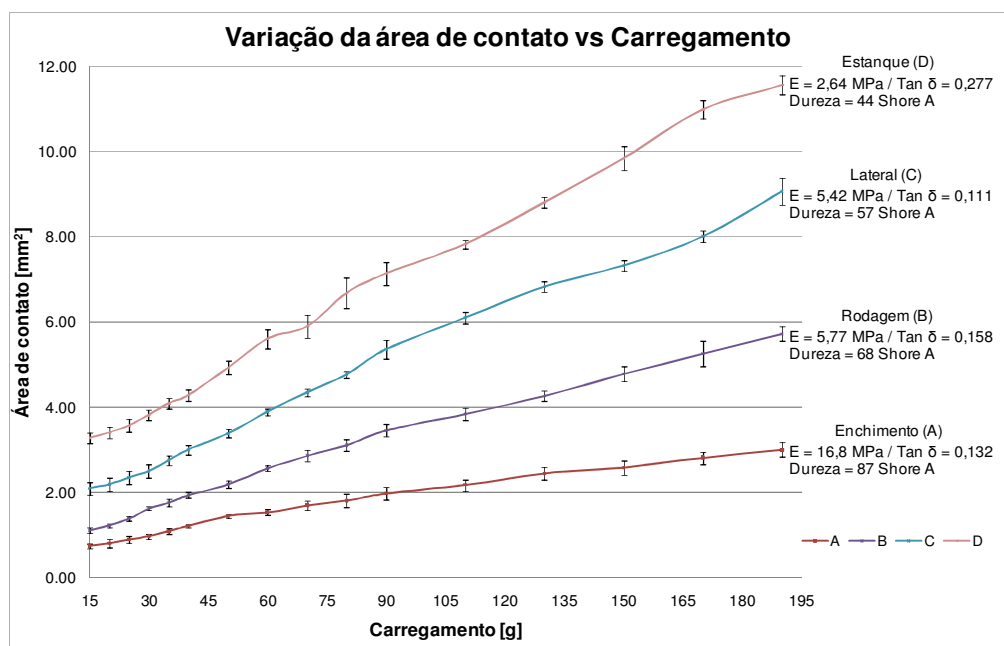


Figura 1 – Variação da área de contato em função do carregamento aplicado, com a representação dos respectivos intervalos de confiança 95%.

A correlação entre aumento da área e módulo de elasticidade era esperada uma vez que na formulação da área de contato (equação 9), esta é a propriedade considerada. A dureza não foi considerada na literatura como fator relacionado à área de contato, porém, nos experimentos, 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.

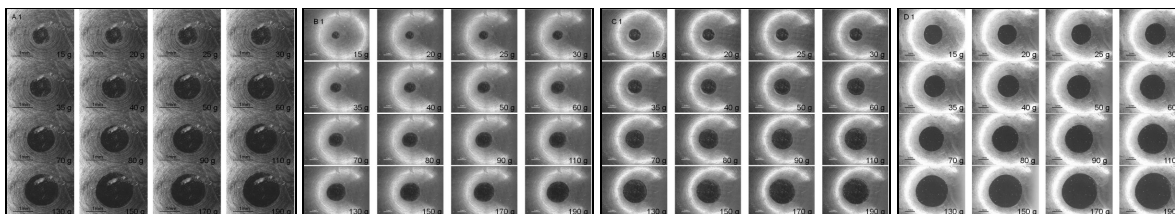


Figura 2 – Variação da área de contato em função do carregamento aplicado. Hemiesferas A1, B1, C1 e D1; enchimento, rodagem, lateral e estanque, respectivamente.

### 5.1.1 Discussão dos resultados frente aos modelos de Hertz e JKR

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 ( $\gamma$ ) = 35 erg/cm<sup>2</sup> = 35 x 10<sup>-3</sup> N/m (por superfície); coeficiente de Poisson = 0,5; Raio (R) da hemiesfera = 15 mm; módulo de elasticidade (E) igual ao de cada hemiesfera usada nos experimentos.

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 diâmetros encontrados nos experimentos, com as hemiesferas C e D, 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.

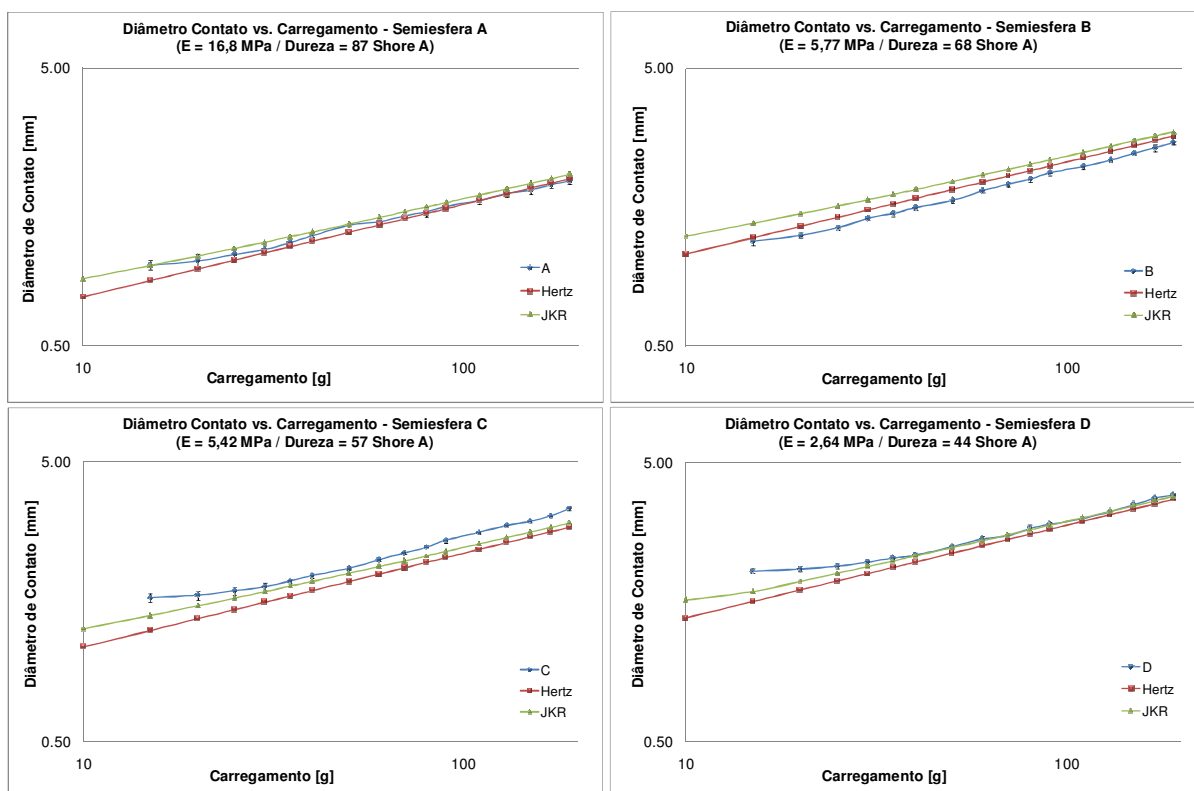


Figura 3 – Diâmetro de contato das hemiesferas A, B, C e D em comparação à formulação feita por Hertz (1896) e Johnson, Kendall e Roberts (1971).

## 5.2 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) e Briggs e Briscoe (1979). Utilizando a formulação de Johnson, Kendall e Roberts (1971) para estimar a energia de separação ( $\gamma$ ) entre as superfícies em contato para os quatro compostos, obtiveram-se: A ( $\gamma = 115 \text{ erg/cm}^2 = 115 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ), B ( $\gamma = 555 \text{ erg/cm}^2 = 555 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ), C ( $\gamma = 948 \text{ erg/cm}^2 = 948 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ) e D ( $\gamma = 25.490 \text{ erg/cm}^2 = 25.490 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ).

Tabela 2 – Força de separação das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro.

Hemiesferas		Massa para separação [g]*			E (Mod. Elasticidade)	Dureza	Tan $\delta$
		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

\* sinal negativo indica que foi necessário aplicar força de tração para separar as superfícies em contato.

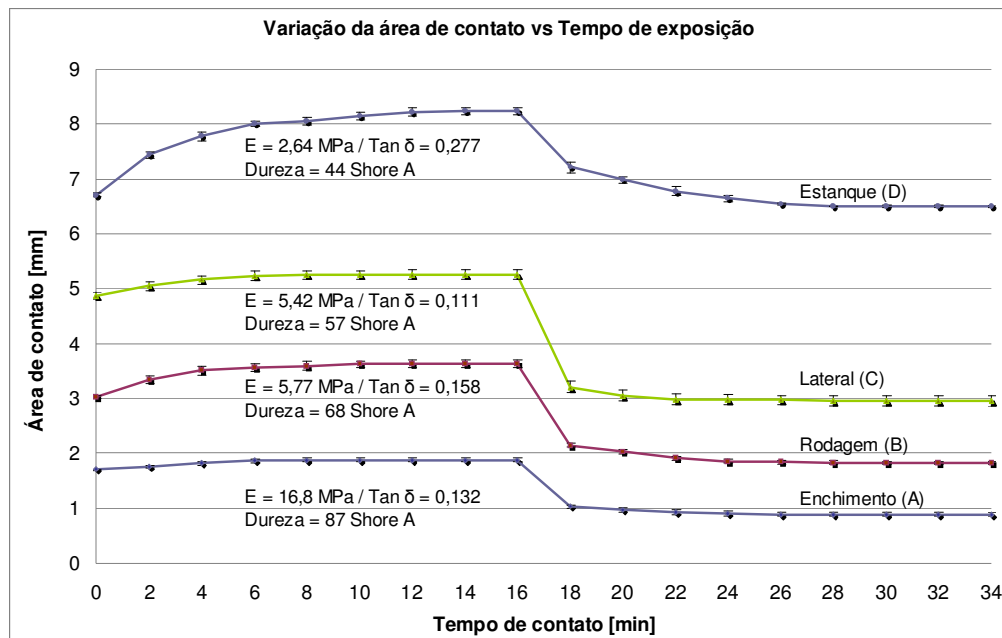
Os valores de energia de separação ( $\gamma$ ) encontrados para os compostos A, B e C, estão coerentes com estudos realizados por Briggs e Briscoe (1979), que encontraram valores da ordem de  $100 \text{ erg/cm}^2$  a  $5000 \text{ erg/cm}^2$  dependendo do carregamento e composto utilizado. Roberts e Thomas (1974) encontraram valores de  $180 \text{ erg/cm}^2$  no contato entre hemiesferas de borracha natural contra uma superfície de vidro.

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  $15.000 \text{ erg/cm}^2$ . 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 ( $\gamma$ ) encontrado.

Observa-se também 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.

### 5.3 Efeito do tempo na área de contato

A variação de área no carregamento foi maior (23%) para o composto D, de maior  $\text{Tan } \delta$  (0,277) e foi menor (8%) para o composto A, de menor  $\text{Tan } \delta$  (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. A variação de área entre os minutos 16 e 18 na figura 5 representa a retirada do carregamento (45g) imposto inicialmente no sistema.



**Figura 4 - Variação da área de contato das hemiesferas de borracha com a superfície de vidro em função do tempo de exposição ao carregamento.**

Para compostos de menor  $\text{Tan } \delta$ , a área de contato atinge o patamar de equilíbrio em menor tempo. Os compostos A ( $\text{Tan } \delta = 0,132$ ) e C ( $\text{Tan } \delta = 0,111$ ) 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  $\text{Tan } \delta$ , atingir o patamar de equilíbrio leva mais tempo. O composto B ( $\text{Tan } \delta = 0,158$ ) levou aproximadamente 12 minutos para atingir o equilíbrio e apresentou uma variação de área de contato de 20%, e o composto D, de maior  $\text{Tan } \delta$  (0,277) levou 14 minutos para atingir o equilíbrio com uma variação de área de 23%.

**Tabela 3 – Variação da área de contato do momento de aplicação de carga até o equilíbrio da área de contato.**

Hemiesferas	Área inicial [mm <sup>2</sup> ]	Área final [mm <sup>2</sup> ]	% Variação de Área	Tan $\delta$
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

Porém, o  $\text{Tan } \delta$  não é a única propriedade que influenciou o resultado em função do tempo de exposição, pois a correlação de variação de área e  $\text{Tan } \delta$  não foi linear. Para poder comparar apenas a influência do  $\text{Tan } \delta$  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  $\text{tan } \delta$ , pois o composto D, de maior  $\text{Tan } \delta$  (0,277) apresentou a segunda menor variação de área de contato (11%).

Quanto maior o  $\text{Tan } \delta$ , 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  $\text{Tan } \delta$ , como por exemplo, a curva do material C (lateral) que possui  $\text{Tan } \delta = 0,111$ . 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.

**Tabela 4 – 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.**

Hemiesferas		Área inicial [mm <sup>2</sup> ]	Área final [mm <sup>2</sup> ]	% 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

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.

## 6 CONCLUSÕES

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.

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 ( $\gamma$ ), 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 separação 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.

## 7 REFERÊNCIAS

- Adamson, A. W. - Physical chemistry of surfaces, Londres: Interscience, 1967. 317 p.
- Almer, D. J. (Editor). Aspects of adhesion. Londres: University of London Press, 1971. Volume 6, 149 p.
- ASTM D 1566:2009: Terminologia de borrachas. 2009.
- ANDERSON, A. E. et al. Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM Handbook. Volume 18.
- 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.
- DIN 4761/2: Características geométricas das superfícies. 1978.

- DIN 4768/4777: Determinação de parâmetros de rugosidade. 1990.
- 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.
- ISO 1382: Rubber Vocabulary. 5ª edição. 2008.
- ISO 3274: Especificação geométrica do produto – textura de superfície. 2ª edição. 1998.
- ISO 4288: Especificação geométrica do produto – textura de 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. Nova York: Elsevier, 2002.
- Pocius A. V.; Dillard D. A. Adhesion science and engineering – II. 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: 2004.

## 8 RESPONSIBILITY NOTICE

### STUDY OF RUBBER HEMISPHERE CONTACT AREA WITH A FLAP GLASS PLATE

**Renato Lucato Gimenez**  
**Amilton Sinatora**

GE Oil & Gas – Drilling and Production - Rodovia de Acesso João de Goes, 2300 - Jandira - SP, CEP: 06612-000 - Brasil. (renato\_gimenez@yahoo.com)

Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Mello Moraes, 2231. 05508-900 São Paulo, S.P. Brasil. (sinatora@usp.br)

**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, 57 and 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:** *Contact area; Exposure time; Adhesion.*

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.