

# DESGASTE DE HASTES POLIDAS DE AÇOS DE UNIDADE DE BOMBEIO SOB DESLIZAMENTO ALTERNADO EM BORRACHA HNBR<sup>1</sup>

Washington Batista de Lima<sup>2</sup>  
Fillipe Oliveira dos P. Santos<sup>3</sup>  
Ricardo de Medeiros Martins<sup>3</sup>  
Mayara Suély Cândido Ferreira<sup>4</sup>  
Ruthilene Catarina Lima da Silva<sup>5</sup>  
João Telésforo Nóbrega de Medeiros<sup>6</sup>

## Resumo

Avaliaram-se os mecanismos e taxas de desgaste de quatro combinações de aços de hastes metálicas polidas (API 11B: aço AISI 316, AISI 1045, AISI 4140 e AISI 4142) e um pacote de retentores elastoméricos de HNBR confinados em uma caixa de engaxetamento de unidade de bombeio de petróleo. Os ensaios de deslizamento alternado foram executados em uma bancada instrumentada, buscando-se manter minimamente um filme lubrificante em regime de lubrificação EHD. A amplitude do curso era de 8<sup>1/4</sup> polegadas (209,6 mm). Foram utilizados como parâmetros na análise do desgaste: medidas pontuais da velocidade global de vibração [mm/s], dureza *Shore A* dos retentores, batida radial e rugosidade Ra das hastes polidas, antes e após cada ensaio. O mapeamento térmico polar desenvolvido para o contato metal-borracha sugeriu um desalinhamento do sistema, confirmado pela dispersão nas medidas de dureza da borracha após os ensaios. O método usado demonstrou ser capaz de evidenciar a resposta do dano causado ao sistema de vedação de unidade de bombeio de petróleo, sem interromper o funcionamento do sistema.

**Palavras-chave:** Desgaste; Engenharia de petróleo; Unidades de bombeio; Retentores; Hastes polidas.

## WEAR OF POLISHED ROD STEELS UNDER RECIPROCATING SLIDING AGAINST HNBR RUBBER IN A STUFFING BOX OF A JACKPUMP

### Abstract

The wear rate and mechanisms of four metallic alloys (API 11B Standard: AISI 316, AISI 1045, AISI 4140 and AISI 4142 Steel) integrating the polished rods of jackpumps were evaluated after sliding against HNBR rubber into a stuffing box. The tribological pair included a thin lubricant film, resulting of the reciprocating motion of the steel rod, which characterized minimally an EHD lubrication regimen. The stroke length was 8<sup>1/4</sup> inch (209,6 mm). The analysis of wear was based on the overall vibration velocity [mm/s] during the testings, Shore A Hardness of the rubber, radial error and Surface Roughness Ra [ $\mu\text{m}$ ] of the polished rod, before and after each test. The temperature measurement of hoop and radial directions, suggested a directional misalignment of the polished rod, confirmed by dispersion of hardness measurements of the rubber hardness after the tests. The developed approach produced some wear damage responses of the sealing system without the traditional maintenance stopping of the pumping system.

**Key words:** Wear; Polished rod; jackpump; Seals.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica – PPGEM / UFRN, Natal - RN.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, UFRN, Natal - RN.

<sup>4</sup> Graduanda em Engenharia de Materiais da UFRN, Natal - RN.

<sup>5</sup> Doutoranda em Engenharia Mecânica – PPGEM / UFRN, Natal - RN.

<sup>6</sup> Professor Dr. do Departamento de Eng.<sup>a</sup> Mecânica e do PPGEM / UFRN, Natal - RN.

## 1 INTRODUÇÃO

As *hastes polidas*, localizadas no topo da coluna de uma unidade de bombeamento de petróleo, têm como objetivo proporcionar melhor vedação na cabeça do poço.

Thomas<sup>(1)</sup> diz que essas hastes operam em ambientes abrasivos e/ou corrosivos. Estão sujeitas a carregamentos cíclicos, uma vez que o peso do fluido que está acima da bomba é sustentado pela coluna de hastes no curso ascendente e pela coluna de produção no curso descendente. Devido a essa alternância de esforços a coluna de hastes se torna um ponto crítico do sistema. A seção da coluna de hastes sujeita à maior força de tração está na haste polida, por sustentar as seguintes cargas: peso das hastes, força de empuxo, força de aceleração, força de atrito e o peso do fluido.

A haste polida é a primeira haste no topo da coluna, e é chamada assim, por ter sua superfície externa polida. O processo de fabricação das hastes é feito conforme a norma API 11B. O objetivo de utilização desta haste é, juntamente com os retentores da caixa de vedação, promover a vedação entre a unidade de bombeio e a cabeça do poço de petróleo, Thomas.<sup>(1)</sup>

A resistência à alta temperatura é um fator crítico do pacote de retentores usados em sistemas de bombeio, pois a maior temperatura é localizada na interface dinâmica da vedação, além disso, essa temperatura interfacial é muito difícil de medir e prever em operação. Todos os elastômeros são afetados de uma forma ou de outra pelas temperaturas elevadas e a vida do retentor diminui com o aumento dessa temperatura.<sup>(2)</sup>

Silva, Silva e Medeiros<sup>(3)</sup> e Medeiros<sup>(6)</sup> utilizaram Microscopia Eletrônica de Varredura para investigar morfologias de desgaste associadas à pressão de contato, à dureza e velocidade relativa de um par tribológico e à temperatura próxima ao contato, parâmetros associados à irreversibilidade de um processo tribológico.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o par tribológico haste polida-gaxeta de HNBR (borracha nitrílica butadieno hidrogenada) utilizado em unidades de bombeamento de petróleo. Para isso, foram medidas as temperaturas dos retentores submetidos a ensaios de deslizamento alternado em uma bancada de bombeamento. Além das medidas de temperatura e da dureza *Shore A* das gaxetas, também foram medidas a rugosidade, dureza Rockwell, batida radial das hastes polidas antes e após os ensaios também foram utilizadas como parâmetros na análise do desgaste.

A taxa de desgaste é um método de quantificação usado porém, no caso de uma unidade de bombeio de petróleo, o volume de material desgastado pode ser mascarado pela absorção do petróleo pelos elastômeros (*swelling*).

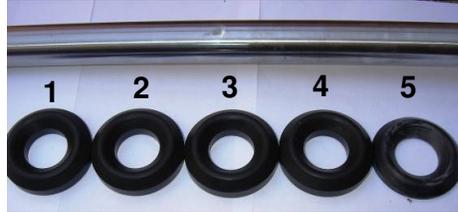
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Sete pacotes novos comercialmente disponíveis compostos, cada um, por cinco retentores (gaxetas) de borracha nitrílica butadieno hidrogenada (HNBR), com dimensões 66,00 mm X 31,75 mm X 15,60 mm, foram ensaiados contra barras cilíndricas polidas de quatro tipos de aços diferentes: AISI 316, AISI 1045 revestido, AISI 4140 e AISI 4142 revestido, todas com o mesmo diâmetro de 31,75 mm e 1,0 m de comprimento (Figura 1). As hastes polidas utilizadas neste estudo apresentaram os seguintes valores de microdureza e rugosidade:

(1) Aço AISI 316 (dureza HV<sub>0,05</sub> 353±19 e rugosidade Ra de 0,37±0,08 µm),

- (2) aço AISI 1045 ( $HV_{0,05} 892\pm 12$  e  $Ra$  de  $0,30\pm 0,01\mu m$ ),
- (3) aço AISI 4140 ( $HV_{0,05} 226\pm 25$  e  $Ra$  de  $0,55\pm 0,02\mu m$ ) e
- (4) aço AISI 4142 ( $HV_{0,05} 1356\pm 26$  e  $Ra$  de  $0,26\pm 0,01\mu m$ ).

A haste de aço AISI 1045 possuía revestimentos de níquel e cromo e a haste de aço AISI 4142 possuía revestimentos de cromo duro e molibdênio.

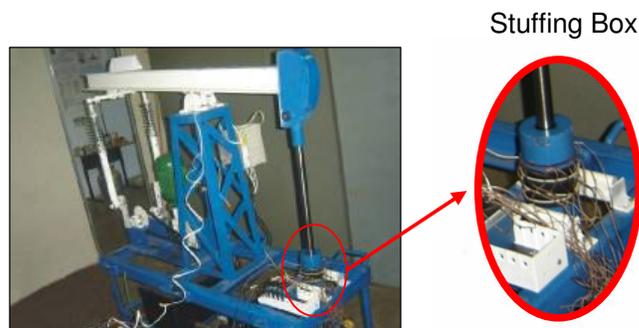


**Figura 1.** Haste polida de aço AISI 316 e retentores de HNBR.

Foi utilizada, para os ensaios, uma bancada experimental de movimento alternado (Figura 3), que simula as condições tribológicas de operação de uma unidade de bombeio de petróleo, cujos componentes de vedação estão na escala 1:1. Cada ensaio foi programado para 24 horas, utilizando-se um torque de aperto na *stuffing box* de 25 N.m.

O torque de aperto foi aplicado à tampa da caixa de vedação, conforme a tampa é apertada, imprime-se uma pressão sobre o prensa gaxeta, que tem a função de comprimir uniformemente o pacote de gaxetas. Como o conjunto está confinado na caixa de vedação, a única direção possível de deformação das gaxetas é em torno da haste polida, aumentando assim, a pressão de contato entre a haste e as gaxetas. O aumento da pressão de contato resulta no aumento do coeficiente de atrito ( $\mu$ ), e conseqüentemente, no aumento do desgaste entre as superfícies.

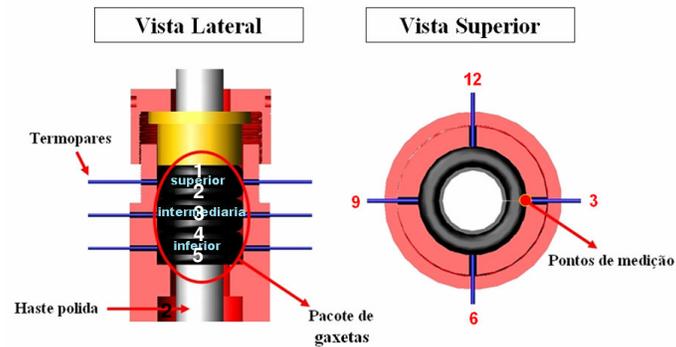
O motor de acionamento (1,5 CV, 1.700 rpm) do redutor sem-fim/correa (1:19) era acoplado a uma segunda redução (1:3) por corrente a um sistema biela-manivela semelhante a uma unidade de bombeio real, para assegurar movimento alternado da haste.



**Figura 3.** Bancada experimental de deslizamento com movimento alternado.

As temperaturas no entorno da *Stuffing Box* eram coletadas por doze termopares tipo "J", calibrados em Laboratório, seguindo a disposição mostrada na Figura 4, e mais um, registrando a temperatura ambiente através de uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*, modelo NI USB4350, acoplada à entrada USB de um Computador. A taxa de aquisição de temperatura foi de uma medida por segundo. Registraram-se as temperaturas do pacote de gaxeta em três

níveis verticais (superior, intermediário e inferior) da caixa de vedação e, em um mesmo nível, em quatro posições circunferenciais distintas (12 h, 3 h, 6 h e 9 h).



**Figura 4.** Mapeamento térmico da caixa de vedação.

A potência foi medida através de um inversor de frequência WEG modelo CFW09, via computador, à taxa de aquisição de uma leitura por segundo.

A velocidade global de vibração foi medida através de um medidor de vibração NK 300 com aquisição a cada 30 minutos.

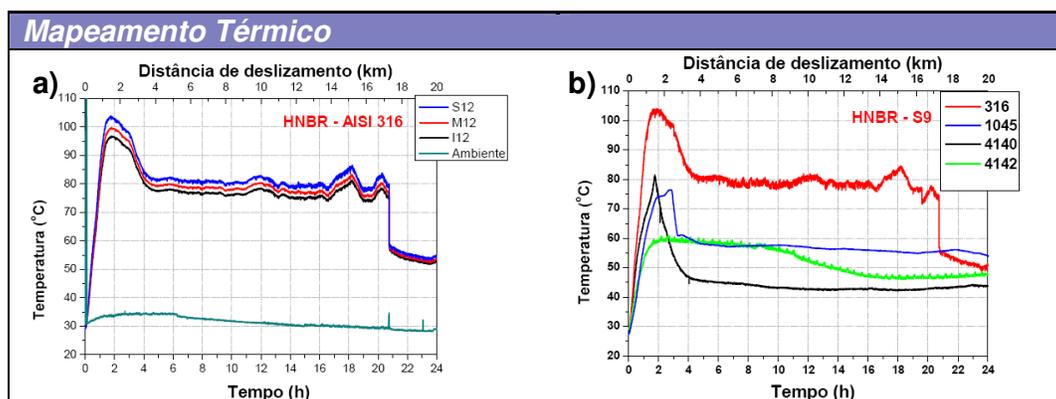
Para simular as condições reais de operação, a bancada experimental de movimento alternado também possuía um sistema de circulação de petróleo.

Antes e após cada ensaio eram realizadas medidas de batida radial e rugosidade nas hastes. As gaxetas eram limpas em banho ultrasônico (10 minutos) secas e pesadas. As medições de massa de cada gaxeta eram repetidas sete vezes e considerada sua média aritmética, enquanto a dureza era tomada por 8 medições, a cada 45° para todos os retentores. Três ensaios piloto precederam os definitivos.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Temperatura Ambiente e na Carcaça da Caixa de Engaxetamento

A Figura 5a mostra a história térmica da caixa de engaxetamento com a haste polida AISI 316, durante o ensaio. As três curvas superiores mostram as temperaturas registradas nas posições superior 12 h, intermediária 12 h e, inferior 12 h, evidenciando um comportamento aparentemente semelhante para todos os pontos. A temperatura ambiente registrada foi de 31 °C ± 1. A Figura 5b, confronta a história térmica para as quatro hastes polidas, registrada pelo termopar S9.



**Figura 5.** História térmica registradas nos ensaios.

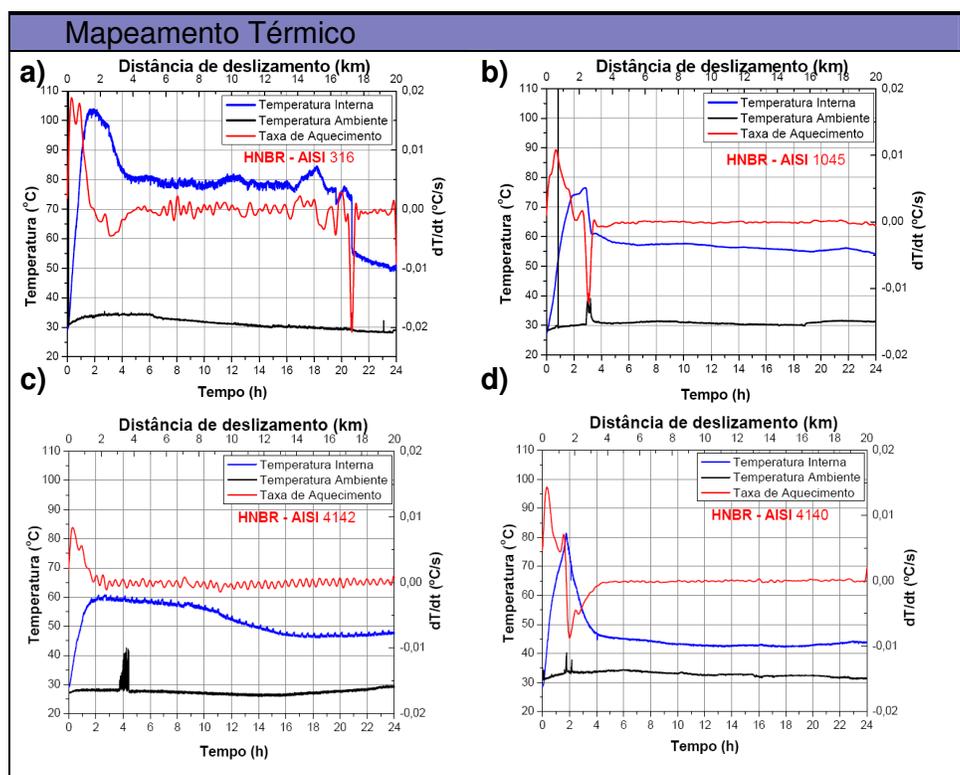
Em todas as regiões e ensaios, a gaxeta submetida ao maior aquecimento foi a superior, seguida da gaxeta intermediária e da inferior, como mostrada na Figura 5a.

Com o objetivo de facilitar a interpretação da Figura 5b, esboçaram-se quatro novos gráficos (Figura 6a-d), separando as temperaturas registradas por cada haste na caixa de vedação (gaxeta superior, direção 9 h). Foi escolhida a gaxeta superior, posição 9 h, por haver se submetido a maiores temperaturas, que foram associadas a um desalinhamento de 3 graus da haste polida nessa posição. Para evidenciar o desalinhamento da haste são mostradas na Tabela 1 as temperaturas relacionadas às posições 12 h, 3 h, 6 h e 9 h, onde se constata que, na posição 3 h, temos as menores temperaturas e, na posição 9 h, as maiores temperatura.

**Tabela 1.** Temperatura de estabilização para as gaxetas superiores em torno de 16 horas de ensaio.

Mapeamento Térmico				
Aços	AISI 316	AISI 1045	AISI 4142	AISI 4140
Posições	Temperatura Registrada (°C)			
12 h	79,5±1	55,2±1	42,6±1	50,9±1
3 h	79,0±1	53,4±1	42,3±1	50,4±1
6 h	79,1±1	54,1±1	42,5±1	50,4±1
9 h	80,0±1	56,2±1	43,0±1	51,0±1

Na Figura 6 representa-se o envelope de dados explicitando o limite superior das temperaturas (em azul), a ambiente (em preto) e em vermelho é mostrada a taxa de aquecimento.



**Figura 6.** Gráficos de mapeamento térmico para os ensaios das hastes AISI 316(a), AISI 1045(b), AISI 4142(c) e AISI 4140(d) Contra HNBR.

Os gráficos de temperatura, como os da Figura 6a, destacam o período de *running-in*, de ajuste inicial em que predominam mecanismos de deformação plástica das asperezas do sistema tribológico. Nos 22 minutos iniciais de ensaio, temperaturas da ordem de 47°C associaram-se a uma taxa de aquecimento de 0,014 °C/s. Nesse regime, desenvolve-se uma folga micrométrica entre as superfícies devido ao desgaste, um vazamento perceptível de um filme micrométrico de petróleo, caracterizando, assim, um filme lubrificante na interface do contato.

A partir daí e até cerca das duas horas iniciais do ensaio, o filme lubrificante formado, além de diminuir o atrito entre as superfícies, também atua como refrigerante. Isso provoca uma diminuição gradativa da taxa de aquecimento, embora as temperaturas registradas continuem aumentando, até atingir 102°C.

Após as duas horas de ensaio, a espessura do filme lubrificante aumentou o suficiente para promover uma redução nas temperaturas registradas. O resfriamento da superfície também pode ser comprovado pela taxa de aquecimento negativa (- 0,0013 °C/s). Em seguida, a taxa voltou a ficar positiva, o que sugere um aumento do atrito e, a partir daí, a temperatura tendeu a se estabilizar com pequenas oscilações até 20h30 de ensaio. (Neste momento, houve uma queda de energia elétrica na rede externa, com retorno da energização após alguns minutos, provocando uma parada momentânea da bancada).

O surgimento de um filme lubrificante, formado entre as superfícies e lubrificando o sistema, é observado em todos os ensaios após o *running-in*, provocando diminuição da taxa de aquecimento gradativamente, até se estabilizar.

Na Figura 6b, o *running-in* está contido nos primeiros 12 minutos de ensaio, registrando-se temperaturas de 31°C a uma taxa de 0,005 °C/s. A partir daí, e durante 2h50 de ensaio, aconteceu uma diminuição da taxa de aquecimento, embora as temperaturas registradas continuassem aumentando, até atingir 76°C.

Após 2h50 de ensaio, o resfriamento da superfície pode ser comprovado pela taxa de aquecimento negativa. Em seguida, a taxa aproximou-se de zero e, a partir deste ponto, a temperatura tendeu a se estabilizar até o fim desse ensaio.

Na Figura 6c, o *running-in* está contido nos primeiros 13 minutos de ensaio, registrando-se temperaturas de 34°C a uma taxa de 0,007°C/s. A partir daí, e durante 2h36 de ensaio, aconteceu uma diminuição da taxa de aquecimento, embora as temperaturas registradas continuassem aumentando, até atingir 60 °C.

Após 2h36min de ensaio, o resfriamento da superfície pode ser comprovado pela taxa de aquecimento que oscilou entre picos de 0,00002°C/s e -0,00007°C/s, atingindo uma temperatura final de 47°C.

Na Figura 6d, o *running-in* está contido nos primeiros 17 minutos de ensaio, registrando-se temperaturas de 39°C a uma taxa de 0,013°C/s. A partir daí, e durante 1h42min de ensaio, aconteceu a diminuição da taxa de aquecimento, embora as temperaturas registradas continuassem aumentando até atingir 81°C.

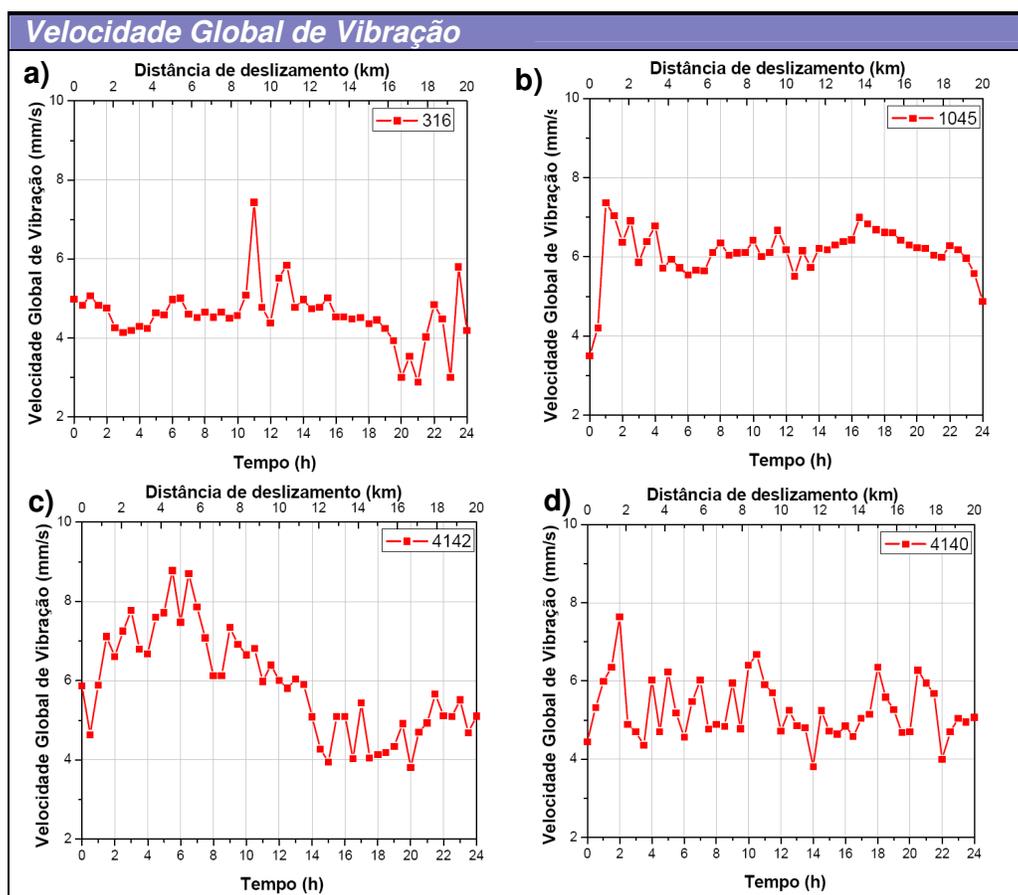
Após 1h42 de ensaio, a temperatura diminuiu gradativamente, até 10 horas de ensaio. Nas 14 horas restantes, a taxa de aquecimento tendeu a zero e a temperatura estabilizou-se em torno de 43°C.

### **3.2 Velocidade Global de Vibração**

Na Figura 7 são mostrados os gráficos dos valores RMS da velocidade global de vibração [mm/s]. No ensaio com a haste AISI 316, obtiveram-se os limites inferiores desse parâmetro, cuja predominância situou-se na faixa compreendida de 4 mm/s a 5 mm/s, enquanto os limites superiores da velocidade global de vibração disseram

respeito ao ensaio com a haste AISI 4142, na faixa compreendida de 8 mm/s a 9 mm/s.

Apesar dos ensaios não terem sido feitos com repetição devido à carência da obtenção do material elastomérico das gaxetas, atribuiu-se esse limite superior da velocidade global de vibração, ao desprendimento de *debris* duros decorrentes do filme fino depositado e/ou do maior teor de carbono presente nos aços, e sua conseqüente maior tendência na formação de carbonetos e martensita induzida por deformação e respectivo desprendimento, em função do movimento de vai-e-vém da haste metálica. Esse indício é reforçado quando se constata, no entorno de 9 km do ensaio da haste de aço AISI 316, um pico de 7,5 mm/s nesse parâmetro, possivelmente em decorrência de um desses *debris* atuando como uma partícula abrasiva constitutiva do terceiro corpo no contato metal-borracha.



**Figura 7.** Gráficos das velocidades global de vibração para os ensaios das hastas AISI 316(a), AISI 1045(b), AISI 4142(c) e AISI 4140(d) Contra HNBR.

### 3.3 Potência de Acionamento do Sistema

A potência demandada pelo motor nos quatro ensaios foi registrada e consta na Figura 8, onde é esboçada como uma função do tempo. Constatou-se um transiente de até 3,5 km nesse parâmetro, após o que a potência entrou em regime permanente, com algumas flutuações durante os ensaios.

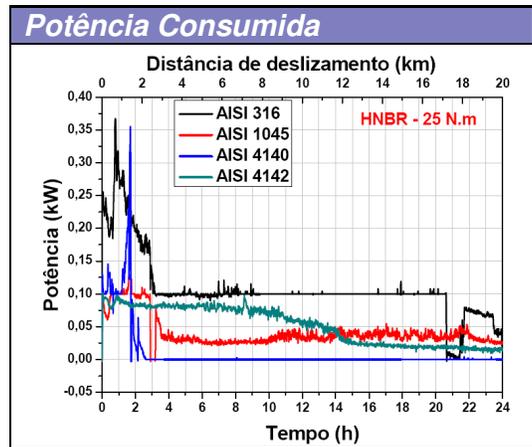


Figura 8. Gráfico da Potência demandada pelo motor elétrico nos ensaios.

Considerando-se que houve a aplicação de um mesmo torque de aperto da caixa de engaxetamento de 25 N.m para os quatro pares ensaiados, é relevante a primeira constatação: o consumo de energia elétrica para acionamento do sistema quando se utilizou o aço AISI 316 foi sempre superior ao consumo dos demais. Isto depõe contra o seu uso como haste polida, apesar da sua reconhecida resistência à corrosão, mas, claramente, baixa resistência à abrasão por sulcamento, formação de proa ou corte por partículas duras.

Por outro lado, a demanda de energia elétrica no ensaio do aço AISI 4140 foi tão baixa, no regime permanente, que se situou no limiar inferior de sensibilidade do sistema de medida da potência após 2,5 km de ensaio.

Os transientes do sinal da potência acompanharam a tendência do comportamento dos sinais de temperatura que são medidas indiretas do atrito existente no sistema, ou seja, quanto maior a temperatura no ponto maior o atrito. Após um *running-in*, um filme lubrificante foi induzido pela folga gerada entre as superfícies do par haste-gaxeta e a potência consumida pelo motor entrou em regime permanente, com pequenas flutuações atribuídas à presença de terceiros corpos no contato.

### 3.4 Rugosidade Superficial

Para representar a topografia superficial das hastes ensaiadas, utilizou-se o parâmetro Ra, recomendado pela norma API 11B, bem como o RMS da rugosidade, Rq e, ainda, a assimetria da superfície (*skewness*) em relação à média, o Rsk.

Os gráficos da Figura 9 mostram uma variação da rugosidade diferenciada para cada haste polida. Para o aço AISI 316, o Ra e Rq tenderam a aumentar, após o ensaio e o Rsk se manteve constante, insinuando ter havido um maior desgaste abrasivo nesta haste em relação às demais. Isto reforça a hipótese do desgaste associado à menor dureza do material AISI 316 e/ou à presença de terceiros corpos no contato metal-borracha durante o ensaio, devido ao desgaste da própria haste, o que aumenta a pressão de contato pontual entre o par. Os aços AISI 1045 e o AISI 4142 mostraram rugosidades semelhantes. O aço AISI 4140 apresentou uma menor rugosidade Ra e Rq ao final do ensaio, porém seu Rsk aumentou significativamente, demonstrando que a superfície desse aço, após o ensaio, teve maior desgaste em relação às demais.

Pode-se perceber que devido a sua menor rugosidade final a temperatura durante o ensaio apresentou a maior queda, evidenciando assim, menor atrito.

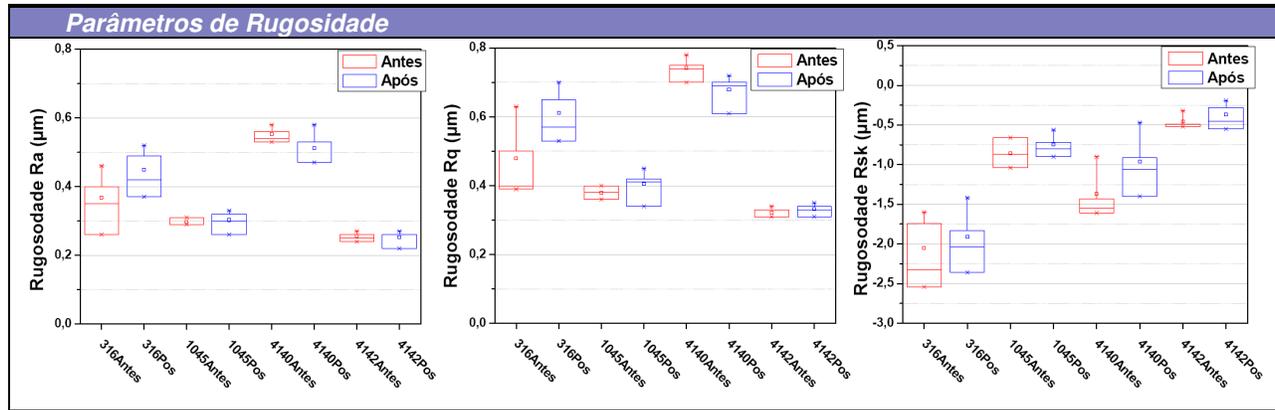


Figura 9. Rugosidade superficial Ra das hastes antes e após cada ensaio.

### 3.5 Desvio de Batida Radial

Os gráficos esboçados na Figura 10 apresentam os desvios de batida radial em cada haste. Percebe-se que as hastes de aço AISI 1045 e 4142, que possuíam filmes finos, possuíam também uma maior dispersão do desvio de batida radial das hastes na “condição nova, como recebidas”, diferentemente dos aços sem filme fino. Na Figura 7, já se percebiam maiores valores de velocidade global de vibração para esses dois aços com filmes finos e se formularam hipóteses associadas ao material; a este instante, essa dispersão geométrica revela-se como uma outra *driving force* da vibração mecânica.

Após os ensaios, a dispersão dos desvios de batida radial das hastes de todos os materiais diminuiu, ratificando o processo de desgaste por deformação plástica instituído na geratriz cilíndrica das hastes. Contudo, enquanto nos dois materiais revestidos com filme fino registrou-se uma majoração de pelo menos 10 µm na mediana do desvio de batida radial após os ensaios, a tendência foi contrária nos materiais sem revestimento, aços AISI 316 e 4140, ou seja, após os ensaios eles conservaram ou diminuíram o desvio mediano de batida radial.

Pode-se atribuir essa variação ao processo de metalização pelo qual foram submetidas as hastes de AISI 1045 e 4142, dada a própria natureza aleatória associada às superfícies resultantes desses processos.

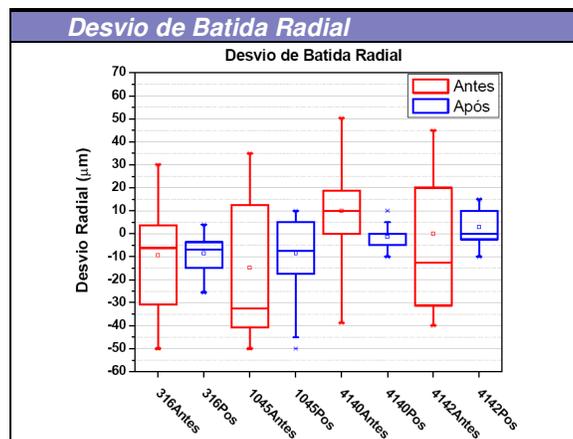
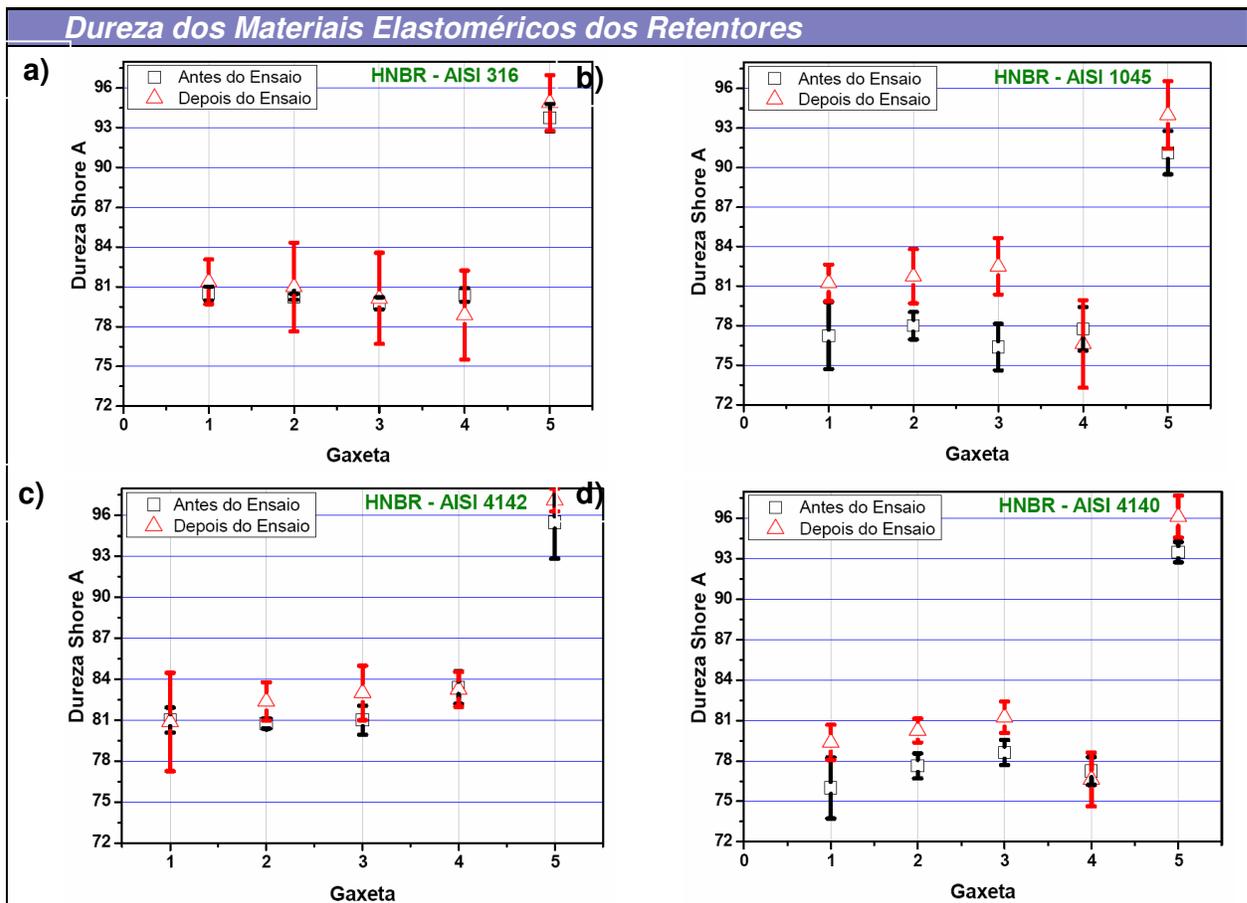


Figura 10. Desvio de Batida Radial para todas as hastes antes e após ensaio.

### 3.6 Dureza dos Elastômeros das Gaxetas

A Figura 11 registra um aumento na dureza dos elastômeros após os ensaios. A gaxeta inferior do pacote, representada aqui pelo número 5, apresentou pelo menos 10 Sh A a mais na dureza que as outras, demonstrando que o seu fabricante a diferenciou geometricamente das demais, porque a sua constituição é diferente das demais: é aquela que entra em contato direto com o fluido de processo, aquecido.

No ensaio com haste AISI 1045 ocorreu o maior aumento da dureza das gaxetas após ensaio, onde a gaxeta 3 teve um aumento de 8% (Figura 11b), no entanto as gaxetas de número 4 mostraram redução após os ensaios com exceção do ensaio com AISI 4142 que não variou significativamente, sendo a maior redução 2% no ensaio com a haste AISI 316, que também caracterizou-se por apresentar as menores variações, como mostrado na Figura 11a.



**Figura 11.** Dureza Shore A dos elastômeros HNBR dos retenores, antes e após os ensaios, associados às respectivas hastes AISI 316(a), AISI 1045(b), AISI 4142(c) e AISI 4140(d).

## 4 DISCUSSÃO

Como sugere o metrologista inglês Whitehouse,<sup>(4)</sup> uma análise integrada de sistemas mecânicos pressupõe a compreensão plena do seu desempenho funcional associado ao papel de suas superfícies e dos fenômenos tribológicos interagentes.

Neste escopo, um dos desvios de forma em hastes polidas, o de batida radial, quando acentuado, pode inviabilizar o seu desempenho quanto à vedação, incorrendo em agressões ambientais indesejáveis.

Os parâmetros de rugosidade confrontados com os outros dados demonstraram que a haste polida AISI 316 sofreu maior desgaste, o que se associa às maiores temperaturas durante seu ensaio, em relação às dos demais.

Para avaliar no que isto implica do ponto de vista funcional, como apresentado por Whitehouse,<sup>(4)</sup> decidiu-se quantificar a velocidade global de vibração – uma variável que pode ser quantificada sem necessidade de se parar o sistema – três parâmetros de rugosidade superficial e os quartis dos desvios de batida radial, apresentando-os em gráficos *box-and-plot*. As hastes de todos os materiais ensaiados demonstraram responder a essas variáveis em decorrência dos ensaios.

Entretanto, as hastes metalizadas não apresentaram variações significativas nos parâmetros Ra e Rq, mas uma maior sensibilidade ao parâmetro Rsk, juntamente com a haste AISI 4140. O parâmetro metrológico Rsk é um terceiro momento estatístico e diz respeito à assimetria ou distorção da superfície, ou seja, uma medida da simetria em relação à linha média da topografia superficial, indicando se as asperezas são predominantemente negativas (vales) ou positivas (picos). A predominância de vales como pode ser visto na análise do parâmetro de Rsk possibilita a formação de um filme fino entre as superfícies em contato.

O primeiro efeito da alta temperatura sobre um elastômero é promover compostos, isto é, uma mudança nas propriedades físicas. O aumento do tempo de exposição a elevadas temperaturas acarretam em alterações químicas, isto geralmente provoca um endurecimento.<sup>(5)</sup>

Após uma análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software OriginPro 7.5, identificou-se que, com uma confiabilidade de 95% houve diferença significativa entre os valores de dureza antes e após o ensaio. Concluiu-se que, para uma janela temporal de 24 horas de ensaio, a uma velocidade de 39 golpes por minuto e com a caixa de vedação ajustada com 25 N.m de torque de aperto, a dureza do material HNBR da gaxeta é afetada, ou seja, ratificando a observação do fabricante de retentores Parker,<sup>(5)</sup> evidenciando uma mudança nas propriedades físicas do composto elastomérico inicial.

A equação de Archard não foi utilizada neste estudo devido à perda mássica do elastômero, a qual foi mascarada devido ao efeito da absorção de óleo e seu conseqüente inchamento (swelling).

As hastes AISI 316, AISI 1045, AISI 4142 e AISI 4140 não apresentaram variação significativa na sua dureza após ensaios.

## 5 CONCLUSÃO

Com base no método exposto e nos materiais e condições ensaiados:

- as assinaturas dos sinais de temperatura, potência elétrica e velocidade global de vibração evitaram a parada do processo e possibilitaram avaliar o desgaste e a eficiência do sistema de vibração;

- a dispersão dos desvios de forma, rugosidade superficial e batida radial nas hastes metalizadas evidenciaram que os processos de metalização induziram um aumento na vibração do sistema;
- a haste de aço AISI 316 foi a que apresentou o maior desgaste nas gaxetas;
- em todos os ensaios realizados as gaxetas apresentaram aumento da dureza *shore A*, sendo o maior aumento encontrado no pacote de gaxeta ensaiado com a haste AISI 1045;
- A haste AISI 4140 apresentou melhor comportamento tribológico para as condições de ensaios, entretanto mostrou baixa resistência a corrosão em relação às outras hastes, quando essa está submetida às intempéries.

### **Agradecimentos**

Os autores são gratos à Petrobras UN-RNCE, ao Laboratório de Metrologia da UFRN, a oficina mecânica do NTI/UFRN e ao GET - Grupo de Estudo de Tribologia da UFRN.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 THOMAS, J. E. – **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, 2. ed. Rio de Janeiro: Interviência, 2001.
- 2 KALSI ENGINEERING, Inc. **Kalsi Seals Handbook**, 2001.
- 3 SILVA, R.C.L.; SILVA, C.H.; MEDEIROS, J.T.N. Is there delamination wear in polyurethane? **Wear 263** (2007): 974–983.
- 4 WHITEHOUSE, D.J. Function Maps and the role of surfaces. **Int. J. of Mach. Tools & Structures**, 41(2001): 1847-1861.
- 5 PARKER. **Parker O-Ring Handbook**. Parker Hannifin Corporation: O-Ring Division, 1999.
- 6 MEDEIROS, J. T. N. “Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico”, 2002, **Tese de doutorado**. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 2 Vol.