

ENSAIOS DA BANCADA PINO SOBRE DISCO DE CORTADOR PDC CONTRA ROCHA CALCÁRIA

Da Silva, J.M.¹; Rocha, J.A.M.¹; Vale, Y.G.¹; Fernandes, I.A.¹; Antunes Junior, C.E.¹;
Matamoros, E.P.¹; Filgueira, M.²; Medeiros, J.T.N.¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, ² Universidade Estadual do Norte Fluminense
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Caixa Postal 1524 –
Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-900 | Natal/RN - Brasil
silva.josemagdiel@gmail.com

RESUMO

O cortador PDC (Polycrystalline Diamond Compact) é o componente principal das brocas utilizadas na perfuração de poços de petróleo. O corpo cilíndrico do PDC é composto por uma camada milimétrica de diamante, carbeto de tungstênio e cobalto no topo e na base por carbeto de tungstênio e cobalto. Essa combinação provê alta resistência ao desgaste⁽¹⁾. Este trabalho estuda o desgaste através do ensaio pino sobre disco, cujo par tribológico adotado corresponde ao cortador PDC como pino, deslizando contra um disco de rocha calcária. Este trabalho visa avaliar os parâmetros tribológicos do cortador PDC - tais como a taxa de desgaste, o coeficiente de atrito e a temperatura do contato - variando as velocidades em 0,25 e 0,88 m/s. A condição de maior velocidade proporcionou um desgaste maior, percebido pelo maior afundamento da pista e um maior desgaste adesivo.

Palavras-chave: PDC, rocha calcária, pino sobre disco, coeficiente de atrito, desgaste.

INTRODUÇÃO

Numa situação real de perfuração de poço de petróleo com broca de Compacto de Diamante Policristalino (*Polycrystalline Diamond Compact*, PDC), o desgaste da superfície dos cortadores PDC não ocorre de forma uniforme ao longo da aleta. Por esse motivo o ensaio tribométrico é de grande importância para melhorar a eficiência e/ou vida de um equipamento.

Sabe-se que a Tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies que interagem, abrangendo o estudo do atrito, do desgaste, da lubrificação e das irreversibilidades⁽²⁾. Sendo que o atrito e o desgaste não são propriedades de um material, mas a resposta de um tribossistema⁽³⁾. Por isso é fundamental o uso de equipamentos denominados tribômetros, como o do tipo pino sobre disco. Esse permite que uma carga seja aplicada sobre o pino e que a velocidade do disco seja controlável.

As brocas PDC são as ferramentas mais requisitadas na perfuração de poços de petróleo devido sua alta eficiência⁽⁴⁾. Tal característica é o resultado da combinação de duas propriedades, dureza e ductilidade. A pastilha diamantada na frente de corte do compacto o torna resistente à deformação. Já o suporte formado por carbeto de tungstênio (WC) e um metal ligante, o cobalto (Co), absorve a energia de impacto sofrida pela pastilha. Além disso, o cortador conta com um chanfro que alivia a pressão de contato e previne uma fratura prematura no topo de sua estrutura.

O desgaste do cortador PDC é afetado pela temperatura e ambos são proporcionais à carga aplicada entre as superfícies. Segundo Radtke (2006), após os 300 °C o desgaste do cortador aumenta exponencialmente. Entretanto esse desgaste ocorre de forma microscópica. Já o desgaste macroscópico começa a partir 730 °C com degradação do grão inteiro na pastilha diamantada⁽⁵⁾.

Nesse sentido, este trabalho visa averiguar as aquisições de dados durante o ensaio e observar os indícios que podem ocorrer nas situações ensaiadas em laboratório e em situações real de perfuração, variando a velocidade e medindo o coeficiente de atrito, a taxa de desgaste, a temperatura de contato e a velocidade de vibração global do cortador PDC.

No desgaste adesivo, as ligações internas do material são mais fracas do que as ligações adesivas formadas entre as asperidades das superfícies em contato. O material é removido em pedaços ou em fragmentos dos picos das asperezas. Isto resulta na deformação plástica e desgaste na região de contato, como consequência

do movimento relativo entre as duas superfícies⁽²⁾. A adesão é muitas vezes uma causa de elevados valores de coeficientes de atrito (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2000).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios foram selecionadas duas amostras de cortadores a partir de uma broca PDC utilizada na perfuração de um poço de petróleo na Bacia de Campos/RJ, Brasil. O cortador possui formato cilíndrico com 16,20mm de diâmetro e 15,50mm de altura, sendo 2,00mm de camada diamantada e 13,50mm de metal duro (WC/Co), com uma massa aproximada de 33,0 gramas (Figura 1).

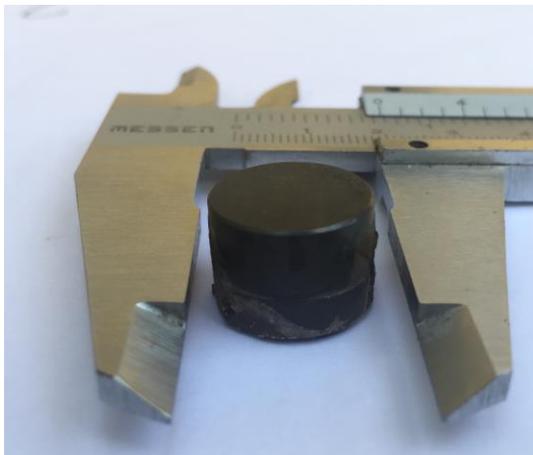


Figura 1. Pino PDC



Figura 2. Discos de calcário

Como contra-corpo foi utilizado rocha calcária para simular o material perfurado pela broca PDC. A rocha calcária teve que ser modelada com um formato de um disco com 16,00mm de diâmetro e 10,00mm de espessura para que pudesse ser fixada a um disco base do tribômetro.

Após o corte das rochas em formato de discos, foi observado que não são perfeitamente planos e para definir quão não planos eles são, recorreu-se ao estudo de erro de planicidade no Laboratório de Metrologia da UFRN. As amostras foram limpas e marcadas com fileiras de 7 pontos, formando 8 linhas radiais com ângulos aproximados de 45 graus entre elas, conforme Figura 2.

Foram obtidas as coordenadas de altura de cada ponto marcado e calculadas as diferenças entre a maior e a menor medida ao longo do mesmo raio. Isso nos fornece o erro de planicidade referente à geometria da pista de desgaste.

Rocha (2013) agrupa as rochas em três divisões, segundo o modo de formação: rochas ígneas, rochas sedimentares, e rochas metamórficas. O calcário, contra corpo utilizado neste estudo, é classificado como rocha sedimentar, que provém caracteristicamente de outras rochas já existentes e/ou de restos orgânicos.

Para a realização dos ensaios foi necessário confeccionar uma garra para comportar o pino PDC de, em média, 16,2 mm de diâmetro. Foi realizado o desenho em CAD no Laboratório de Manufatura da UFRN. Além disso, foi observado que o sensor de desgaste possui uma limitação de 8 mm para a leitura do afundamento da pista. Então, o cortador foi posicionado sempre com a frente de corte em 12h e mantido 9,0 mm do cortador para fora da garra confeccionada. O ensaio tribológico ocorreu colocando--se o pino PDC na garra confeccionada e sendo pressionado sobre o disco, neste caso o mineral calcário. Os parâmetros definidos foram carga de 150 N, variando a velocidade em 0,25 e 0,88 m/s em função dos raios de desgaste de 10 mm para o disco 1 e 35 mm para o disco 2. A caracterização do desgaste foi verificada antes e depois do ensaio tribológico, através de micrografias dos cortadores PDC analisados, sobre as pistas de calcário com os raios supracitados. Os discos foram subdivididos em 12, 3, 6 e 9h para a realização da microscopia óptica com um aumento de 50x até 1000x. Além da caracterização visual, o desgaste também foi quantificado pela perda mássica. Ensaio 1 (Calcário 1): duração 24.280s – que se torna 97.120 ciclos – em distância de deslizamento para raio 10 mm 6.102,229 m ou aproximadamente 6 km. Ensaio 2 (Calcário 2): Duração: 1227 s - que se torna 4908 ciclos - em distância de deslizamento para raio 10 mm 1806,756 m ou aproximadamente 1.8 km.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O movimento de deslizamento pode ser decomposto nos três eixos cartesianos. O pino em relação à pista faz um movimento global que podemos associar ao de uma ponta cantilever em um microscópio de força atômica (AFM), ou com um pneu sobre uma pista esburacada. No arranjo do ensaio, a um primeiro olhar vemos apenas a vibração ao longo do eixo y, ou eixo das alturas, plotada na curva de desgaste (ver Gráfico 4.1). O desgaste nesse caso é a medida do afundamento da pista adquirida pelo sensor LVDT, está embutida nessa medida a soma dos desgastes do pino e do disco, e ainda alguma variação que a medida elétrica sofre com a temperatura. Mas o braço do pino, assim como o braço de uma radiola, também faz um movimento

senoidal lateralmente. Apesar do movimento do pino supostamente estar sendo conduzido apenas pela rotação do disco, as tortuosidades da pista também estão presentes e fazem “derrapar” o pino, assim como quem anda de bicicleta na areia. Logo o movimento no eixo x, ou eixo do movimento lateral, também está presente e conforme esquematizado na Figura 3.

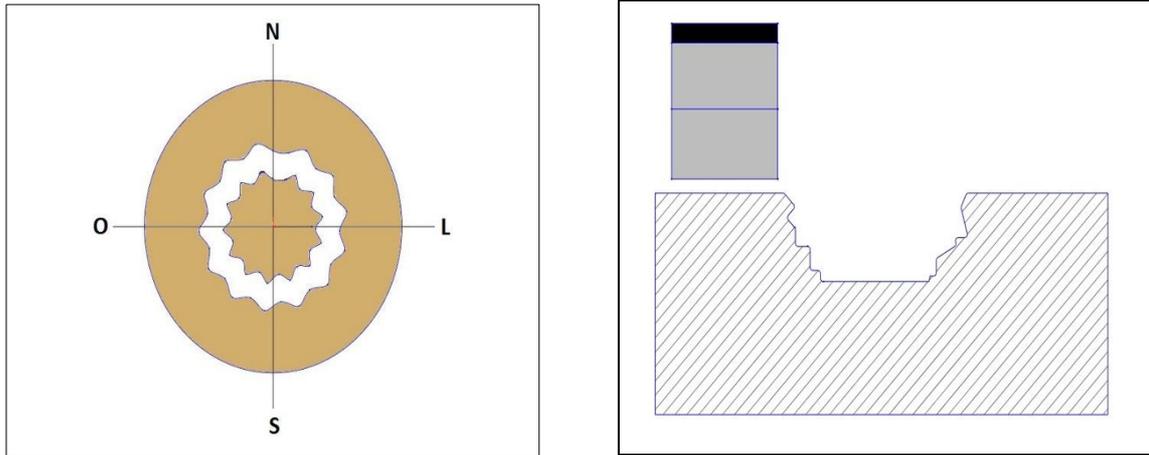


Figura 3. Desenho esquemático mostrando a pista de desgaste em branco, com exagero no formato senoidal da pista, para enfatizar o movimento lateral que ocorre. A figura também apresenta as referências N na frente de corte (*à esquerda*).
Vista da secção transversal (*à direita*).

DESGASTE

O desgaste pode ser definido como a remoção de material da face de um sólido como consequência do movimento entre duas superfícies em contato. Neste ensaio o PDC apresenta uma dureza muito superior à do calcário, ou seja, o composto tenha maior dificuldade ao desgaste que o mineral. Pode-se observar isso na figura 3 (Calcário 1) e na figura 4 (Calcário 2). Ambas apresentam uma taxa de desgaste crescente. A figura 4 mostra a evolução do afundamento da pista ao longo do ensaio, na escala inferior em número de ciclos, e na escala superior em distância de deslizamento.

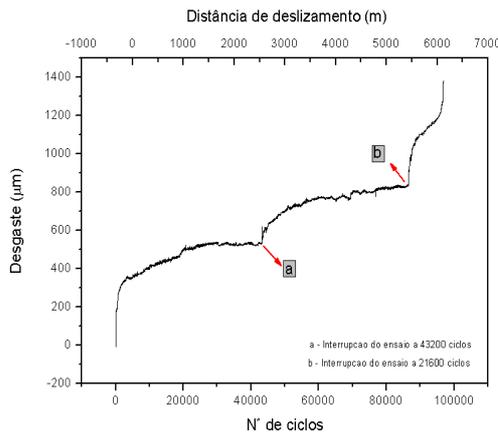


Figura 4. Desgaste do Calcário 1

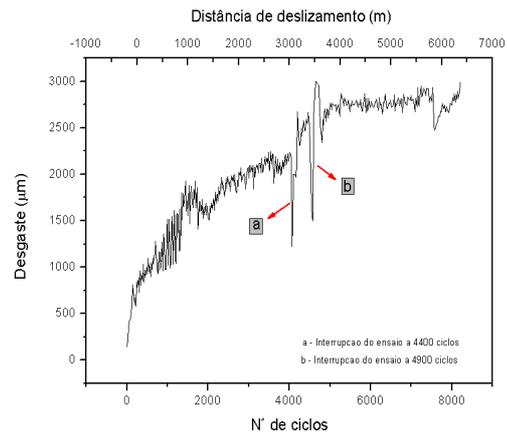


Figura 5. Desgaste do Calcário 2

FORÇA DE ATRITO

Segundo Hutchings, a força de atrito é independente da área de contato aparente e proporcional à carga normal aplicada e é independente da velocidade de deslizamento. Tal fato está confirmado nesse trabalho, pois apenas o parâmetro velocidade de deslizamento variou entre os dois ensaios, e ambas forças de atrito oscilam em torno do valor 80 N, conforme Figura 6 e 7.

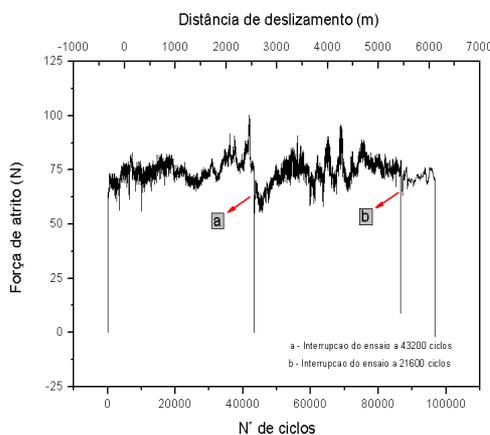


Figura 6. Força de atrito do Calcário 1

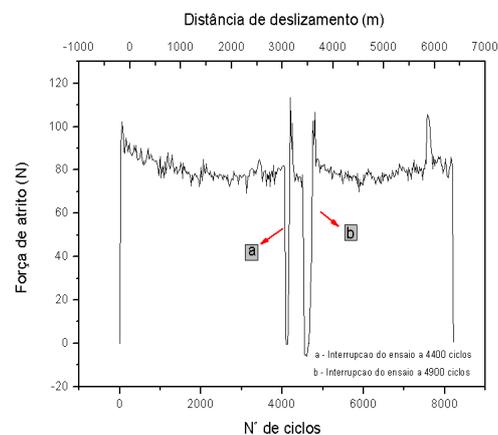


Figura 7. Força de atrito do Calcário 2

COEFICIENTE DE ATRITO

O valor de coeficiente de atrito para contato cerâmica-cerâmica recai tipicamente na faixa 0,25 a 0,8, embora alguns valores menores possam ser encontrados ⁽²⁾. O ensaio apresentou valores variando de, aproximadamente, 0,45 a 0,75 e de 0,35 a 0,65 para o calcário 1 e 2, respectivamente, ratificando a proposição acima.

RUNNING IN

Esse processo pode ser observado, normalmente, no início do movimento rotacional entre duas superfícies em contato. O *running in*, conhecido também por break-in caracteriza-se *breve momento estático que antecede o regime permanente* conseqüentemente um alto coeficiente de atrito estático que após isso o movimento será contínuo.

Podemos observar esse processo no início do ensaio e no ponto 'a' e 'b' de cada parâmetro. O *running in* no *Calcário 1* pode ser observado em cada parâmetro nos intervalos: 0-300 para o desgaste, 30-110 C para a temperatura, 0-75 Newtons para a força de atrito e 0-0.5 para o coeficiente de atrito.

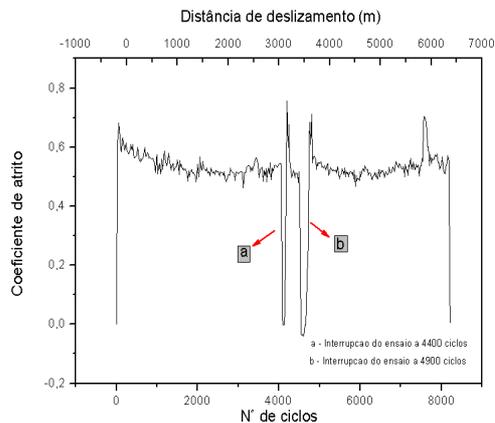


Figura 8. Coeficiente de atrito do Calcário 1

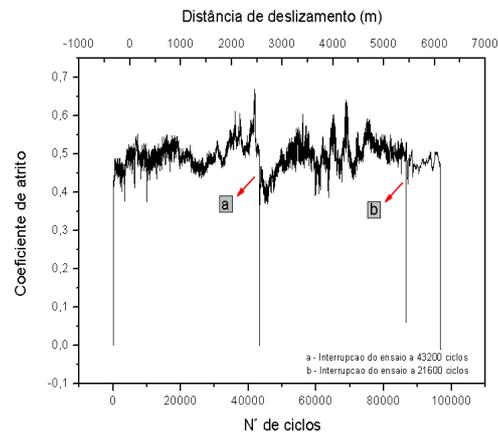


Figura 9. Coeficiente de atrito do Calcário 2

TEMPERATURA

A temperatura é uma medida de energia dissipativa, assim como o atrito. Se espera que o atrito e a temperatura gerada no contato sejam proporcionais, pois ambos estão ligados às irreversibilidades do sistema ⁽⁷⁾. Com respeito a variável temperatura, o ensaio inicia à temperatura ambiente e essa aumenta numa taxa alta durante o *running in* até atingir o *steady state* onde a taxa de aquecimento não varia tanto.

Podemos dizer que quanto maior o atrito maior a temperatura de contato entre as superfícies e também quanto maior a velocidade de rotação do disco de calcário maior será a temperatura no contato entre o pino e a superfície do disco.

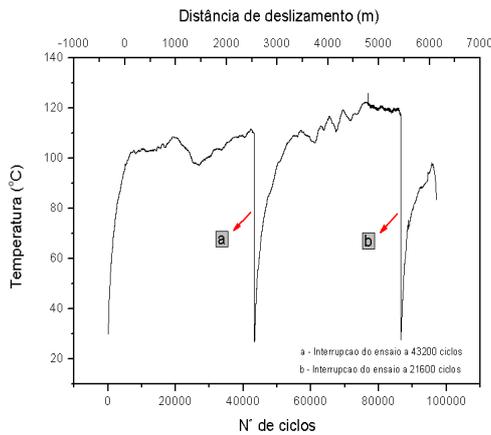


Figura 10. Temperatura do
Calcário 1

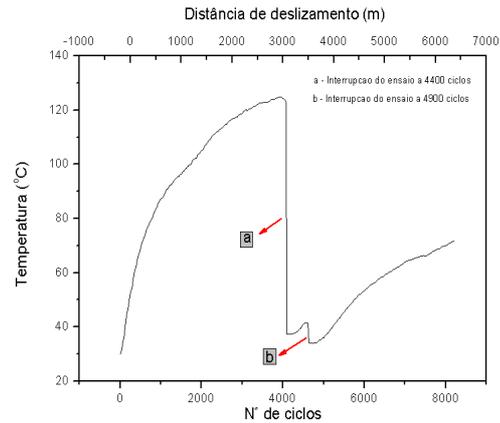


Figura 11. Temperatura do
Calcário 2

DESVIO DE PLANICIDADE

O desvio de planicidade é a diferença entre a maior e menor medida das alturas encontradas com o relógio comparador, isso representa os valores limite do menor e maior plano virtualmente existente. Imaginando duas projeções de planos paralelos, o plano do topo com a maior altura de crista existente e o plano da base com a menor cota de vale adquirida. Trazendo para uma escala mais próxima de nossas experiências, é como se estivéssemos dirigindo numa estrada de terra e as ondulações da pista, as chamadas costelas de vaca, representassem as ondulações. Deslizar sobre uma pista lisa é diferente de deslizar sobre uma pista ondulada, sentimos isso pela vibração, e pela potência que precisamos imprimir para vencer a pista.

MICROGRAFIA

As Figuras 12, 13, 14 e 15 apresentam as micrografias do cortador nas posições norte, sul, leste e oeste para investigação da evolução do desgaste nos intervalos de 43.200 ciclos durante cada ensaio. Sendo o norte a frente de corte.

Como pode ser observado, as posições norte e sul apresentam uma menor concentração de material desgastado, enquanto que nas laterais quase não é possível enxergar a superfície do cortador no microscópio óptico devido ao acúmulo de material. Possivelmente, na posição norte ocorre uma retirada de material devido ao contato mais íntimo entre os corpos, pois a pressão envolvida seria capaz de

remover o material depositado por abrasão ou não permitiria um desgaste adesivo considerável. Já na posição oeste é provável que tenha havido um menor contato real do par tribológico. Esperava-se o contato em linha durante o *running in* e o contato uniforme plano-plano durante o regime permanente. Entretanto, isso não aconteceu, pois houve menor acúmulo de material na região sul, indicando a probabilidade de um contato menos intenso nessa região.

Além disso, é possível identificar que as ranhuras no sentido do deslizamento ficaram mais expressivas com o passar dos ciclos. Esse aumento gradativo nas asperezas pode ser verificado mais facilmente nas posições norte e oeste, observando os intervalos após 43.200 e 86.400 ciclos de ensaio, e nas posições leste e sul ao final do ensaio de 97.120 ciclos.



Figura 12. Micrografias do cortador 1, posição norte nos ciclos: a) 0, b) 43.200, c) 86.400 e d) 97.120 ciclos

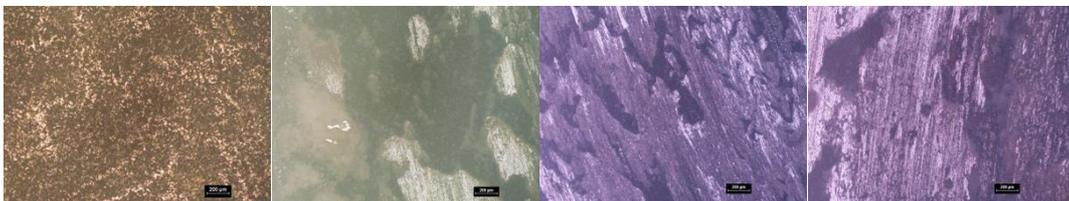


Figura 13. Micrografias do cortador 1, posição leste nos ciclos: a) 0, b) 43.200, c) 86.400 e d) 97.120



Figura 14. Micrografias do cortador 1, posição sul nos ciclos: a) 0, b) 43.200, c) 86.400 e d) 97.120



Figura 15. Micrografias do cortador 1, posição oeste nos ciclos: a) 0, b) 43.200, c) 86.400 e d) 97.120

Para o cortador 2, não é possível achar uma relação entre as micrografias 16 e 17 para acompanhar a evolução do desgaste durante o ensaio, pois o disco partiu com apenas 4.900 ciclos, antes de ocorrer um desgaste adesivo mais expressivo.

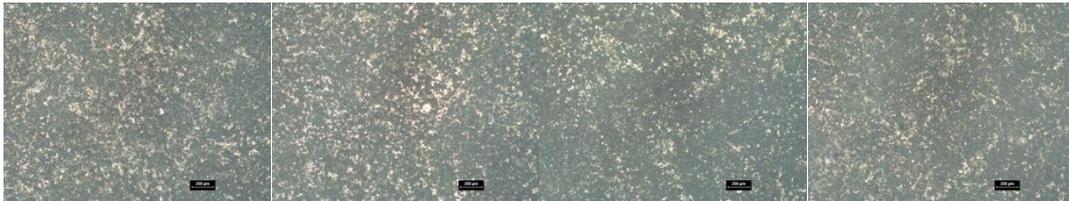


Figura 16. Micrografias do cortador 2 na condição nova nas posições: a) norte, b) leste, c) sul e d) oeste



Figura 17. Micrografias do cortador 2 após 4.900 ciclos nas posições: a) norte, b) leste, c) sul e d) oeste

CONCLUSÕES

É importante estabelecer a posição da frente de corte para estudar a evolução do desgaste do cortador.

O par PDC e calcário sofreu desgaste adesivo pronunciado na condição 0,25 m/s, enquanto que em maior velocidade (0,88 m/s) o desgaste adesivo se mostrou incipiente.

Nesse estudo, o desgaste adesivo em alta taxa pode ser prejudicial para a eficiência da perfuração, pois cobre a superfície diamantada de alta dureza.

AGRADECIMENTOS

Petrobrás, Laboratório de Metrologia, Laboratório de Materiais, Laboratório de Manufatura e o GET/UFRN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MATOS, M.R.I; BOBROVNITCHII, G.S.I; DIAS, C.A.I; GUIMARÃES, R.S.I; PLÁCIDO, R.J.C.II; FILGUEIRA, M.I. Estudo do desgaste de cortadores PDC (polycrystalline diamond). *Matéria* (Rio J.), v.14, n.1, p.1-9, 2009.
- (2) HUTCHINGS, I. M. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Ed. Edward Arnold, London, 1992.
- (3) KATO, Koji. "Wear in relation to friction—a review." *Wear* 241.2 (2000): 151-157.
- (4) RADTKE, R. (2006) *New High Strength And Faster Drilling TSP Diamond Cutters*. Kingwood. Final Report Technology International, Inc.
- (5) Sneddon, M. V., Hall, D.R. (1988) *Polycrystalline Diamond: Manufacture, Wear*
- (6) *Mechanisms and Implications for Bit Design*. Smith Megadiamond, p. 1591-1593.
- (7) ROCHA, J. A. M. Atlas de falhas de cortadores PDC de uma broca utilizada na perfuração de poço de petróleo na bacia de Campos – RJ – Brasil. 2013, 55p. Monografia. LAMAV - UENF, Campos do Goytacazes.
- (8) STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. *Engineering Tribology*. Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, Estados Unidos, 2005.
- (9) MEDEIROS, J. T. N. Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico. 2002, 491p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo.