

# ESTUDO DO DESGASTE DE CORTADORES PDC (POLYCRYSTALLINE DIAMOND)<sup>1</sup>

Mariane Rangel de Matos<sup>2</sup>

Guerold Sergueevitchii Bobrovnitchii<sup>3</sup>

Carlos Alberto Dias<sup>4</sup>

Renan da Silva Guimarães<sup>5</sup>

João Carlos Ribeiro Plácido<sup>6</sup>

Marcello Filgueira<sup>7</sup>

## Resumo

As pastilhas PDC (polycrystalline diamond compact) são compósitos diamantados, onde o suporte de metal duro (WC/Co) absorve a energia de impacto sofrida pela camada diamantada, aumentando a vida útil da ferramenta. A pastilha é formada através da compactação e sinterização de pós de diamante com materiais ligantes (cobalto) utilizando técnicas de alta pressão e alta temperatura (HPHT). Esta ferramenta é utilizada para corte e usinagem; e em perfuração de poços de óleo e gás (brocas). O trabalho visa o estudo da influência de alguns parâmetros de corte no desgaste dos cortadores PDC, simulando a situação de corte: forças sobre o cortador, temperatura na zona de corte, rotação da mesa de granito e ângulo de corte. Correlacionando estes parâmetros, descobre-se quais influenciam mais no desgaste das pastilhas. Os ensaios foram realizados em um simulador físico de corte e abrasão que forneceu os resultados para análise. No presente estudo a condição de corte que propiciou menor desgaste das pastilhas foi a de 15kgf/30RPM/10°.

**Palavras-chave:** Pastilha PDC; Desgaste; Diamantes sinterizados; Ensaios de corte.

## STUDY ON THE WEAR OF PDC (POLYCRYSTALLINE DIAMOND) BITS

### Abstract

PCD bits (poly-crystalline diamond) are composites in which the hardmetal (WC/Co) substrate absorbs the impact loading, thus increasing the PCD lifetime. The bit is processed by the high pressure – high temperature sintering (HPHT) of a mix of diamonds mono-crystals with a binder phase, usually cobalt (Co). This tool is used in cutting and grinding operations, as well as in oil and gas holes drilling. This work deals with the study of the influence of some cutting parameters on the PCD bit's wear, simulating the real drilling operation: loads on the bits, cutting edge temperature, granite base rotation, and bit cutting angles. It was studied the influence of these parameters on the bits' wear by analyzing the graphs from the cutting and abrasion physical simulator. In this work, the smoothest wear condition was 15kgf/30RPM/10°.

**Key words:** PDC bits; Wear; Sintered diamonds; Cutting tests.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62° Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Pesquisadora da PETROBRAS-UNBC, Emboacica, Macaé/RJ

<sup>3</sup> Professor Emérito da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF/Laboratório de Materiais Avançados - LAMAV, Av. Alberto Lamego, 2000, Pq. Califórnia, Campos dos Goytacazes/RJ, CEP 28015-620, Brasil

<sup>4</sup> Professor Titular da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF/Laboratório de Engenharia de petróleo – LENEP, Macaé/RJ

<sup>5</sup> Técnico da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF/Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV

<sup>6</sup> Engenheiro Sênior do CENPES/PETROBRAS, Cidade Universitária, Quadra 07, Rio de Janeiro/RJ, CEP 21949-900, Brasil

<sup>7</sup> Professor Associado da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF/Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV. Av. Alberto Lamego, 2000, Pq. Califórnia, Campos dos Goytacazes/RJ, CEP 28015-620 marcello@uenf.br

## 1 INTRODUÇÃO

Em conformidade com Thomas,<sup>(1)</sup> ao final da década de 1970 foram lançadas novas brocas utilizando diamantes sintéticos. São as chamadas brocas PDC, cuja estrutura de corte é formada por pastilhas ou compactos, montadas sobre bases cilíndricas, instalada no corpo da broca.

De acordo com Gavito,<sup>(2)</sup> as brocas PDC tornaram-se um padrão de ferramenta preferencialmente em quase todas as áreas, onde é necessário o uso de uma ferramenta especial para perfurar formações específicas.

Os cortadores PDC padrão consistem de uma camada diamantada fina e de um suporte de carbetto de tungstênio e cobalto. A camada diamantada é composta de cristais de diamante e cobalto, que é utilizado como ligante e catalisador no processo de sinterização por altas pressões e altas temperaturas (HPHT).<sup>(3)</sup> O compacto resultante tem a dureza e a resistência ao desgaste do diamante na face cortante, com a tenacidade do carbetto de tungstênio-cobalto para melhorar o suporte da camada diamantada. Berman<sup>(4)</sup> avalia o diamante como um componente principal das pastilhas diamantadas, tendo papel relevante no desempenho das brocas PDC. Graças às suas propriedades únicas, foi possível o aumento essencial da vida útil de vários tipos de ferramentas de corte.

Nas referências,<sup>(5-7)</sup> verifica-se que os cortadores PDC tem um chanfro ao redor da periferia da face cortante, para aumentar a resistência ao impacto inicial. Para evitar qualquer dano prematuro potencial para o diamante, a zona de corte do PDC deve apresentar um chanfro periférico que, embora seja pequeno, reduz as tensões concentradas na camada diamantada.

Os cortadores PDC combinam a dureza e a resistência à abrasão do diamante com a estabilidade mecânica do carbetto de tungstênio, propiciando a broca funcionar por mais tempo.<sup>(8)</sup> Altas taxas de penetração, aumento do tempo na perfuração têm resultado em economias significantes no custo da perfuração, quando comparado com outros tipos de brocas em determinadas situações de perfuração<sup>(7)</sup>. Os fatores mecânicos do peso na broca e rotação devem ser coordenados com a seleção da broca, com o propósito de otimizar a taxa de perfuração.<sup>(9,10)</sup> De acordo com Wilson,<sup>(11)</sup> um aumento do peso na broca ou na rotação irá aumentar a taxa de penetração. Segundo Glowka,<sup>(12)</sup> uma baixa velocidade de rotação e um elevado peso na broca contribuem para aumentar a vida útil da ferramenta, desde que o peso na broca não exceda o nível crítico em que o efeito do desgaste térmico torna-se importante.

A temperatura é um fator importante no desgaste da pastilha. Sneddon<sup>(13)</sup> diz que abaixo de 730°C, os cortadores tipicamente desgastam-se em um modo de lascamento microscópico, causado por fadiga mecânica. Já o desgaste macroscópico tem um mecanismo de desgaste diferente que enfraquece as ligações individuais diamante-diamante.<sup>(6)</sup> Mediante a aplicação de cargas cíclicas no cortador PDC, fraturas podem propagar-se lentamente em tensões mais baixas através da camada diamantada. A propagação de microtrincas próximas a superfície do diamante provavelmente enfraquecem a estrutura do grão de diamante, permitindo falha macroscópica a tensões mais baixas. Acima de 730°C, o modo de desgaste por microlascamento muda para severa degradação térmica e retirada do grão inteiro. Esta falha traumática resulta das tensões internas causadas pela diferença de expansão do diamante e do material ligante (Co).<sup>(6,8)</sup>

As pastilhas PDC são aplicadas na perfuração de poços de óleo e gás com litologia caracterizada por presença de rochas médias.<sup>(1,2)</sup> A variedade de aplicações

das brocas PDC e sua correlação com os tipos de formação a ser perfurada, são fatores seletivos no emprego dessas brocas. Os materiais utilizados no processo de perfuração das rochas sofrem influências de vários tipos de fatores, controláveis e não controláveis, o que resulta na perda da integridade total ou parcial dos elementos cortadores da broca.<sup>(14)</sup> Várias técnicas estão sendo propostas e testadas objetivando melhorar o desempenho das brocas, principalmente na perfuração de rochas duras.<sup>(2,7,15,16)</sup>

Com o intuito de obter as melhores condições de desempenho da ferramenta, alguns parâmetros são variados, como a geometria, a posição e a inclinação do cortador PDC nas brocas. Desta forma, pode-se aumentar essencialmente o desempenho de brocas PDC na perfuração de rochas duras, além de diminuir o custo de perfuração por metro perfurado em aproximadamente 50%.<sup>(2)</sup>

Um estudo das novas técnicas de perfuração de rochas duras,<sup>(2)</sup> indicou a necessidade de desenvolvimento de um sistema de testes para as pastilhas PDC aplicadas nas brocas de perfuração, que possibilitem a regulação, o monitoramento e o registro dos parâmetros de perfuração, visando a análise posterior da influência de cada fator sobre o desempenho das pastilhas.

O objetivo deste trabalho é testar pastilhas PDC, utilizadas em brocas de perfuração de rochas médias a duras. É necessário estudar o desgaste das pastilhas, de forma aproximada (simulada) à situação real de corte. Assim, as pastilhas PDC foram comparadas do ponto de vista de corte e abrasão, fazendo uma análise dos vários parâmetros de ensaio: temperatura, rotação da mesa de granito, ângulo de corte, desgaste da pastilha PDC, forças vertical e sobre a pastilha PDC.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos testes, foram utilizadas 3 pastilhas adquiridas da Christensen Roder, tipo PDC IADC 2 "Buttress", de altura e diâmetro iguais a 12,95mm, altura da camada diamantada de 2mm, com chanfro de 25°, e altura do chanfro de 0,5mm, própria para perfuração de poços em folhelhos moles a duros, arenitos moles, e rochas carbonáticas, para taxas de penetração de 3 a 15 m/h.

O material para corte foi um granito cinza, com estrutura orientada, de granulometria grossa, variando de 4 a 20mm. Petrograficamente classificado como Biotita Monzogranito. Contém 32% de quartzo, 31% de microclina micropertítico, 24% de plagioclásio, 11% de biotita, e 2% de acessórios. Apresenta massa específica de 2,67g/cm<sup>3</sup>, absorção d'água de 0,35%, e porosidade total de 0,93%. Foi então produzido um disco deste granito com diâmetro externo e interno de 70 e 40cm, respectivamente, e de altura 5cm. Este disco foi instalado horizontalmente na mesa de Simulador Físico Tipo AMSLER Modificado – Microprocessado Modelo AB800-E da Contenco (este equipamento possui interface com um computador, e utiliza o software Pavitest Abrasímetro 2.31 para a obtenção dos dados). As pastilhas PDC foram acopladas, verticalmente ao disco de granito, em suporte com fixador e goniômetro (que permitiu a realização dos testes mediante inclinações das pastilhas de 10, 20 e 30° - ângulos de corte usuais nas pastilhas de brocas PDC). O suporte também possui um termopar tipo K acoplado, o qual fica em contato direto com a lateral da pastilha PDC, próximo à zona de corte, e a calibração que corresponde à relação desta temperatura com a temperatura na zona de corte foi feita via metodologia disponível na literatura.<sup>(17)</sup>

As rotações de 20, 30 e 40RPM do disco de granito foram utilizadas em face ao uso destes valores na perfuração de poços de óleo e gás com brocas PDC. Foram empregadas as cargas verticais (peso solto) sobre as pastilhas de 10 e 15kgf. Na indústria petrolífera, é usual a carga mínima de 150kgf sobre cada cortador de broca PDC, entretanto, por uma razão de limitação do sistema de simulação utilizado, foram empregadas cargas inferiores. Uma vez posicionada sobre o disco de granito, pastilha PDC também se desloca no sentido radial, com avanço fixo (para este trabalho) em 5mm/min. A profundidade de corte no disco de granito (desgaste da mesa) foi medido por um LVDT, acoplado ao eixo de fixação do suporte das pastilhas PDC. Os resultados de profundidade de corte (desgaste do disco de granito), e temperatura gerada, foram colhidos instantaneamente *in situ*, durante todo o decorrer dos ensaios, os quais duraram 5 minutos cada.

As pastilhas PDC foram pesadas antes e após cada ensaio para o cálculo de desgaste das mesmas, em balança digital Sartorius de precisão 0,00001g. Cada ensaio foi realizado 3 vezes, para a obtenção dos valores médios, a partir dos quais foram traçados os gráficos apresentados adiante.

Microestrutura de pastilha desgastada foram adquiridas via uso de MEV Zeiss 962.

Os parâmetros adotados correspondem, em parte, às condições reais de perfuração de poços de óleo e gás, sem uso de líquido refrigerante e pressurização.

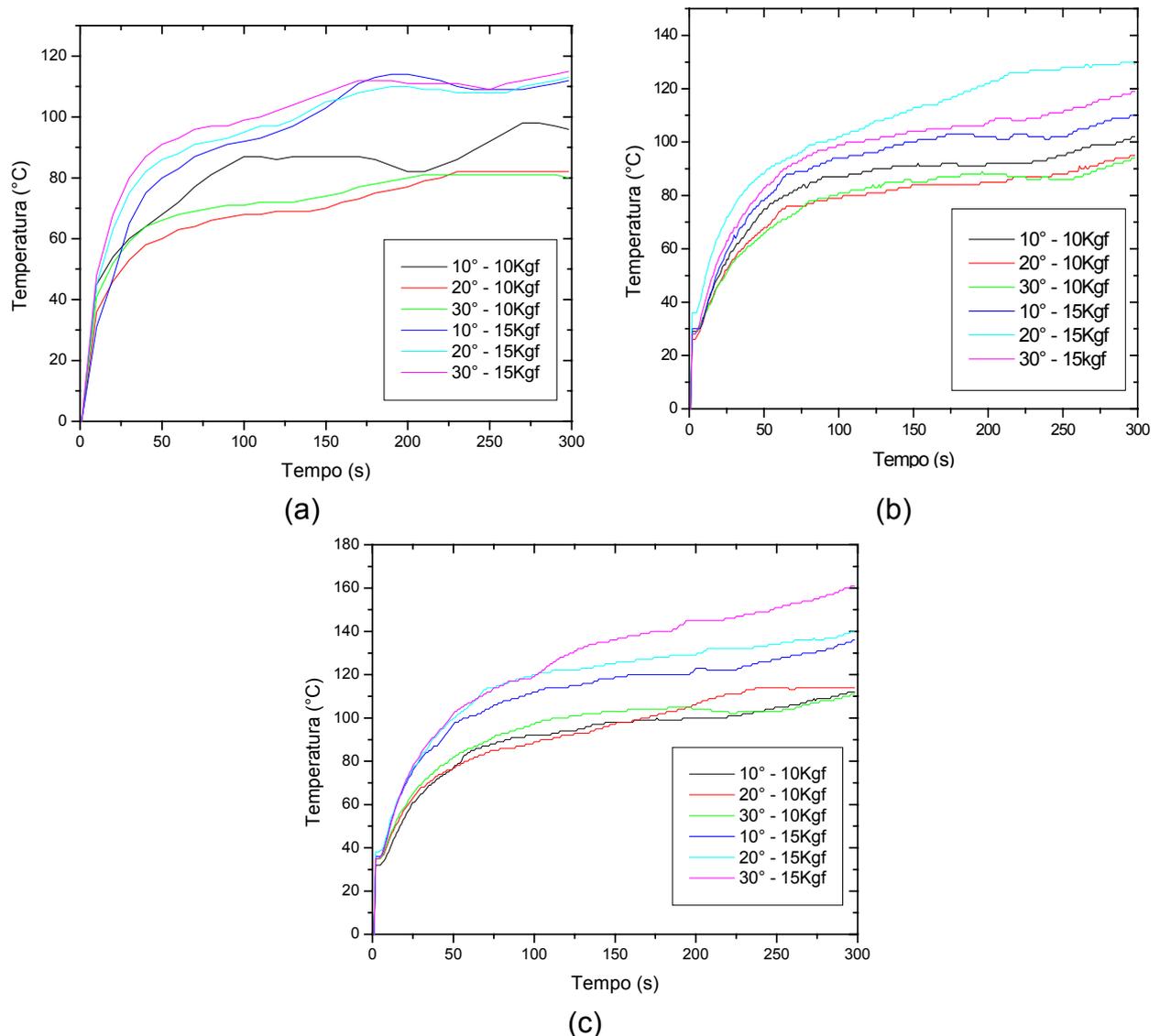
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Figura 1(a-c), que fornece a evolução da temperatura com o tempo de ensaio de corte, para as rotações do disco de granito de 20, 30 e 40RPM, respectivamente, observa-se que ao se aumentar o peso sobre o cortador a temperatura também aumenta, o que é notório. Em relação ao ângulo de corte e à rotação da mesa para 10kgf, não há muita influência na temperatura, já que são alcançadas temperaturas próximas, para qualquer rotação utilizada. Ao se aumentar o peso, o atrito entre a pastilha PDC e o granito é maior, ocasionando assim um aumento na temperatura. Nota-se também que quando a rotação é aumentada, a mesma influencia na temperatura, pois para 15kgf e uma rotação baixa (20RPM), as temperaturas alcançadas são bem próximas, mas ao se aumentar a rotação são atingidas temperaturas mais elevadas. Nesse caso, o ângulo de corte também tem sua influência, pois para ângulos maiores que 10° a temperatura atingida também é maior, para rotações maiores.

Na Figura 1(a-c) observa-se claramente o aumento da temperatura medida nas pastilhas PDC, com o aumento da rotação do disco de granito. As temperaturas evoluem de 80 para 100°C para carga vertical sobre a pastilha PDC de 10kgf, e de 110° C para 160°C para carga de 15kgf. Ou seja, variando a rotação de 20 a 40RPM para carga de 10kgf, não há qualquer efeito significativo sobre a temperatura gerada. Em contrapartida, para a carga aplicada de 15kgf, observa-se um aumento de temperatura da ordem de 31%. Contudo deve ser lembrado que o valor médio da carga sobre uma pastilha PDC de broca nas condições de serviço, é de 10 a 50 vezes superior às cargas aqui utilizadas. Assim sendo, esta análise tem caráter apenas comparativo entre os parâmetros, embora resultados proporcionalmente similares tenham sido encontrados por Gavito,<sup>(2)</sup> testando pastilhas PDC, via emprego de cargas de até 1000kgf sobre uma pastilha PDC.

Mediante a rotação da mesa de granito de 20RPM, e de acordo com a Figura 2(a), o desgaste para o ângulo de corte da pastilha PDC de 10° foi mínimo. Já para

os ângulos de 20° e 30° o desgaste ficou com o mesmo valor, e bem próximo a 0,90mm. Quando se analisa a Figura 2(b), nota-se que o desgaste foi o mesmo, da ordem de 1,2mm, independentemente do ângulo de corte que foi utilizado.



**Figura 1.** Temperatura x Tempo - a) Para 20RPM, b) Para 30RPM, c) Para 40RPM.

Com a rotação da mesa em 30RPM, para a carga vertical de 15kgf, o desgaste da mesa de granito foi o mesmo para qualquer ângulo de corte utilizado, alcançando o valor de 0,90mm, como pode ser visto na Figura 3(b). Quando a carga sobre a pastilha PDC é de 10kgf, e aumenta-se o ângulo de corte, tem-se um pequeno aumento no valor do desgaste, obtendo-se 0,60, 0,80 e 0,90mm para 10°, 20° e 30° respectivamente. Pode-se observar que o uso da carga de 15kgf propicia maior desgaste na mesa de granito (profundidade de corte), do que com a carga de 10kgf, o que é de se esperar.

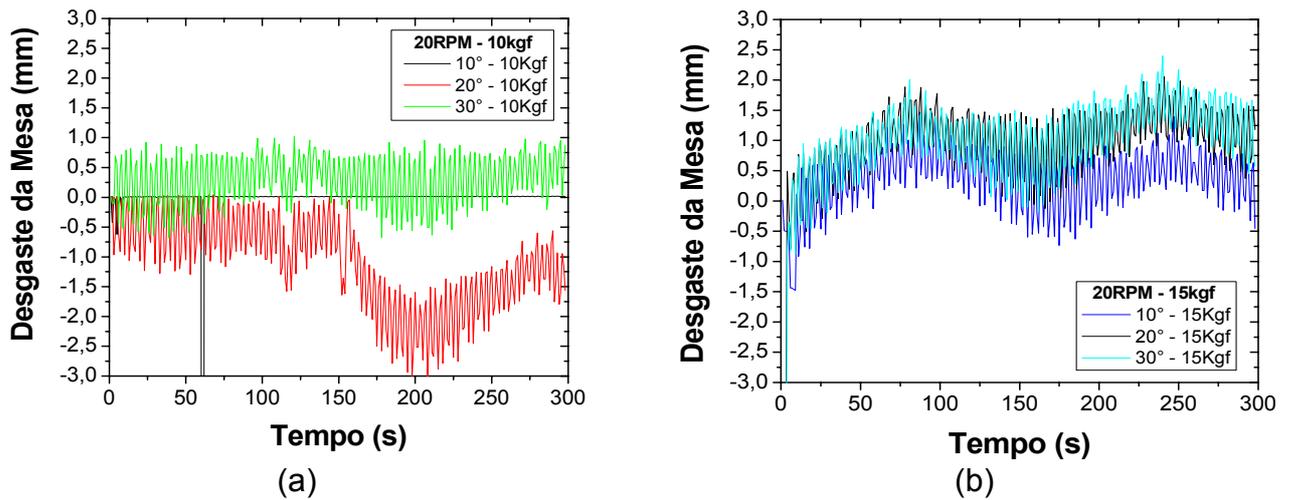


Figura 2. Desgaste da Mesa de Granito via rotação a 20RPM. (a)10kgf e (b) 15kgf.

Para a rotação da mesa de 40RPM e carga de 10kgf, o desgaste da mesa de granito é o mesmo para qualquer ângulo de corte, tendo o valor médio de 0,60mm. Ao aplicar a carga de 15kgf, tem-se uma pequena diferença no desgaste da mesa, sendo de 1,00mm para 10° e 0,80 para 20° e 30°, conforme mostra a Figura 4.

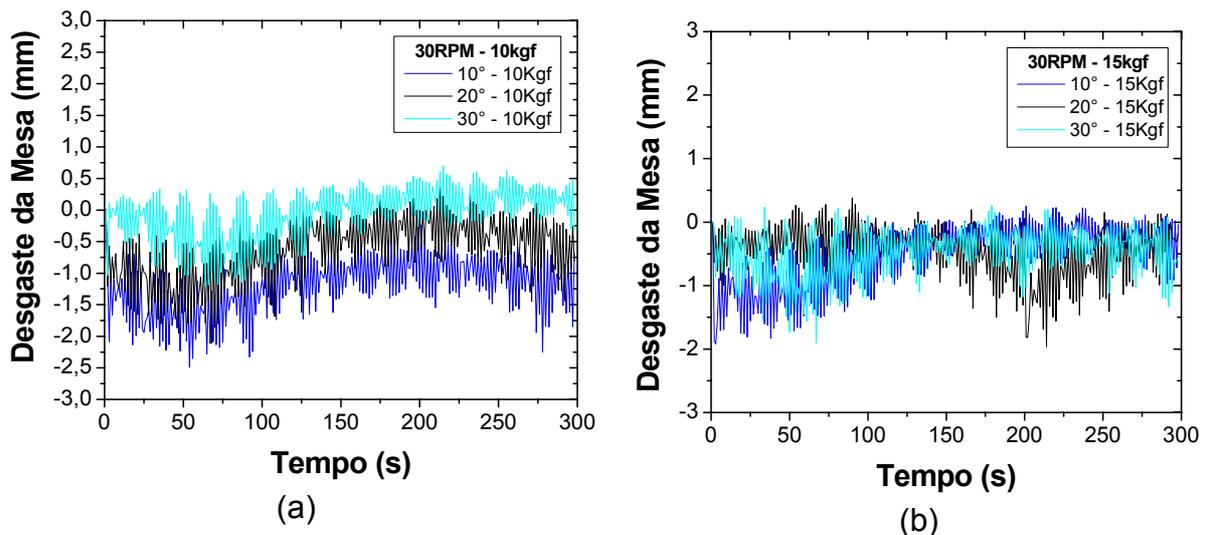


Figura 3. Desgaste da Mesa de Granito via rotação a 30RPM. (a)10kgf e (b)15kgf.

Diante disto, observa-se que a condição que gera maior profundidade de corte, para o mesmo intervalo de tempo, ocorre mediante a aplicação de 15khf de carga vertical sobre a pastilha PDC, e rotação do disco de granito de 20RPM, independentemente do ângulo de corte empregado. Isto traz uma informação importante: para maiores profundidades de corte por unidade de tempo, se faz necessário o emprego de cargas elevadas e rotações baixas, em conformidade com a literatura.<sup>(1,2,12,13)</sup> Vale também informar que, em consonância com o descrito acima, o uso da rotação 20RPM e carga 15kgf gera menor temperatura na pastilha PDC, do que rotações mais elevadas.

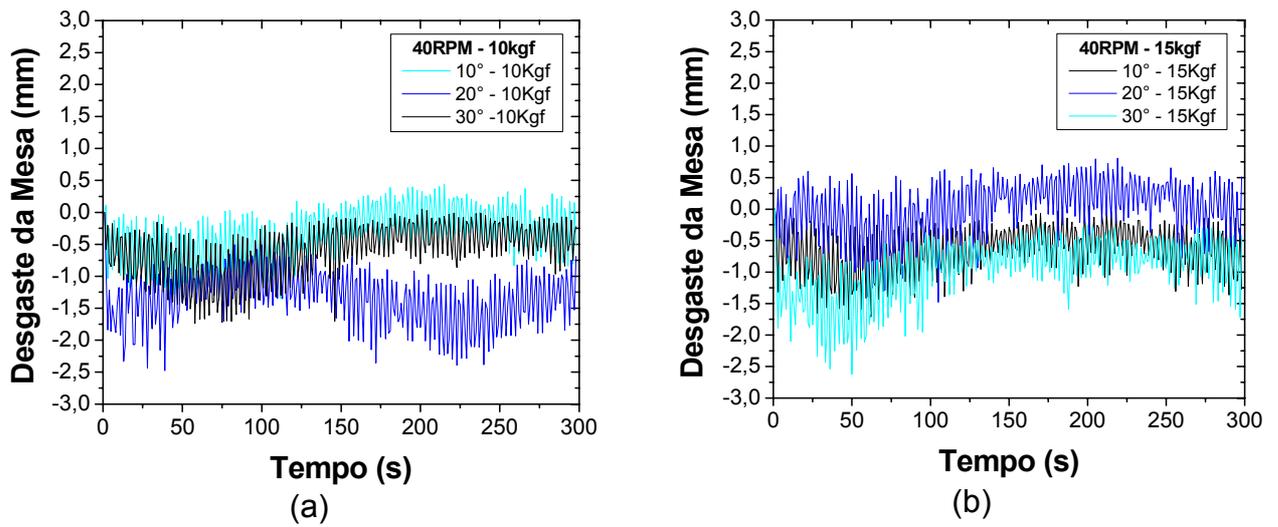


Figura 4. Desgaste da Mesa de Granito a 40RPM. a) 10kgf e b) 15kgf.

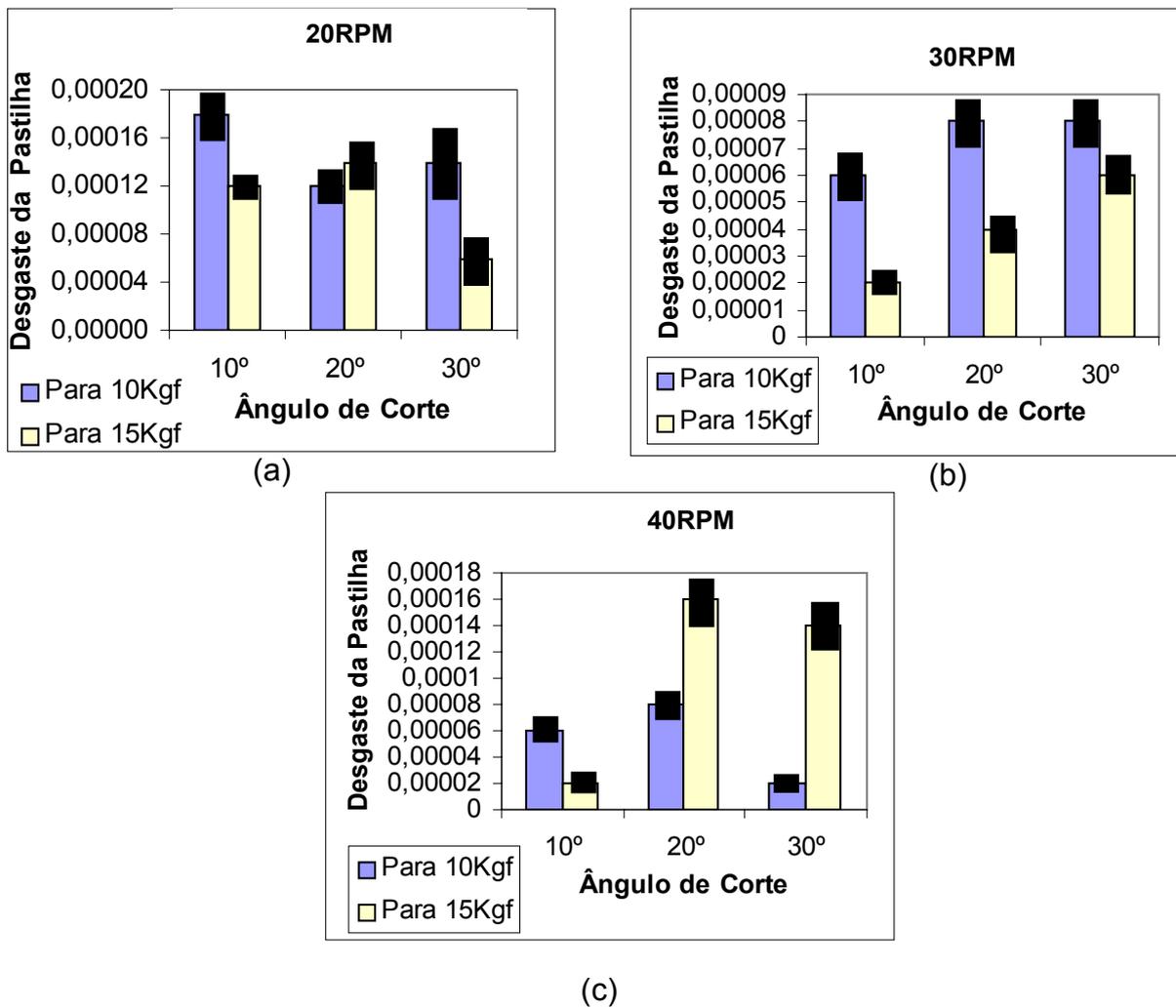
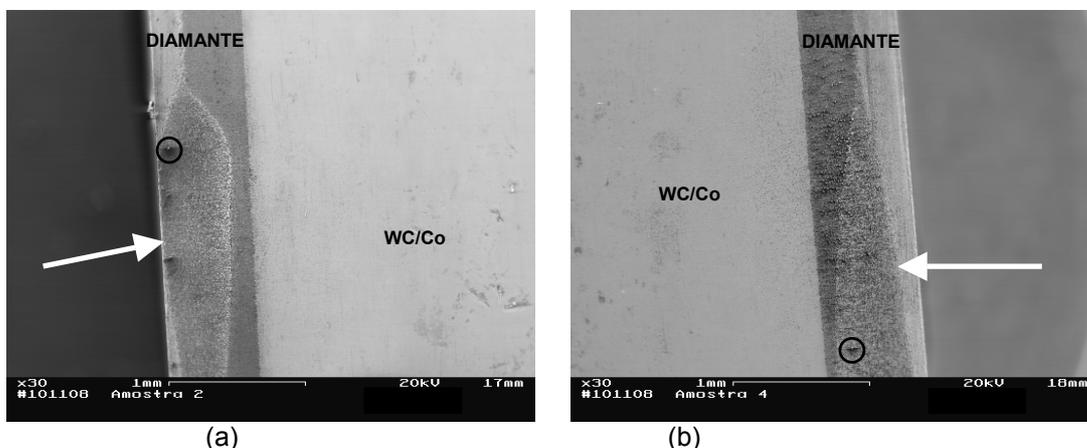


Figura 5. Desgaste das Pastilhas PDC (em gramas) versus ângulo de corte para: a) 20RPM, b) 30RPM e c) 40RPM. As barras em preto indicam os desvios padrões dos resultados para a média de 7 valores.

Da Figura 5 pode-se claramente observar que para a rotação da mesa de granito em 20RPM, os melhores resultados de corte com as pastilhas PDC ocorrem para a carga vertical de 15kgf e ângulo de corte de 30°. Já para a rotação de 40RPM, a melhor situação ocorre para a carga de 15kgf, e ângulo de corte de 10°. Isto indica que ocorre uma nítida inversão do ângulo de corte influente no desgaste das pastilhas PDC, fato esta que está em plena concordância com os resultados obtidos por Gavito,<sup>(2)</sup> e é explicado pelo fato de que usando ângulos de corte pequenos a 20RPM, a interação entre o cortador (pastilha PDC) e a pedra é relativamente baixa, gerando forças tangenciais de corte baixas, já que as brocas PDC perfuram por mecanismos competitivos de impacto (fragmentação) e cisalhamento (corte). Neste tocante, o mecanismo único observado foi o de cisalhamento, pois não foi verificado um impacto por vibração pronunciado para a rotação de 20RPM. Resultados de desgaste das pastilhas PDC são relativamente similares para as rotações da mesa de granito de 30 e 40RPM. As diferenças nas tendências e nos valores de desgaste devem-se à competição entre os mecanismos de corte por cisalhamento e por impacto para a rotação de 30RPM, enquanto que para a rotação de 40RPM o mecanismo de impacto se faz um pouco mais pronunciado que o de cisalhamento.

A Figura 6 ilustra claramente os resultados obtidos na Figura 5, para os ensaios realizados a 30RPM/10°. As setas em ambas Figuras, 6.a e b, mostram o desgaste sofrido pela camada diamantada, a qual tinha a espessura original (antes dos ensaios) de aproximadamente 700µm. Observa-se claramente que a força aplicada de 15kgf promove um desgaste substancialmente menor que quando aplicada a carga de 10kgf. De fato, a Figura 5.b informa que o desgaste para as amostras ensaiadas a 10kgf é da ordem de 3 vezes superior às ensaiadas a 15kgf. Os círculos mostram pequenos cavacos, oriundos da mesa de desgaste de granito.



**Figura 6.** Microestrutura das pastilhas PDC após ensaios de desgaste, nas condições (a) 30RPM/10°/10kgf e (b) 30RPM/10°/15kgf

Frente a estes resultados aqui obtidos, considerando os parâmetros adotados, observa-se que apesar da carga aplicada de 15kgf gerar maior temperatura do que a de 10kgf, a primeira fornece maiores valores de profundidade de corte (desgaste do disco de granito), sendo, portanto, mais indicado o uso de cargas mais elevadas, pois as temperaturas geradas não se traduzem em risco de dano térmico aos materiais das pastilhas PDC.<sup>(3)</sup> Quanto à rotação, 20RPM propicia maior profundidade de corte (1,00mm) juntamente com a aplicação de carga de 15kgf, porém deve-se considerar que a condição 30RPM/15kgf gerou profundidade de corte bem próxima a esta (0,9mm). Para os resultados de perda de massa (desgaste) das pastilhas PDC, observa-se claramente que o menor valor foi obtido

quando se aplica carga de 15kgf, e rotação de 30RPM, para ângulo de corte de 10°. Então, neste estudo, a condição de maior desempenho das pastilhas PDC foi de 15kgf/30RPM/10°.

#### **4 CONCLUSÃO**

Neste trabalho, os parâmetros que propiciaram maior desempenho de corte com as pastilhas PDC foram: rotação da mesa de granito de 30RPM, ângulo de corte de 10°, e força sobre a pastilha PDC de 15kgf. Como contribuição, fica aqui destacado que o uso de cargas elevadas, rotações baixas e ângulos de corte pequenos propiciam maior desempenho e tempo de vida das pastilhas PDC, de brocas de perfuração de poços de petróleo e gás.

#### **Agradecimentos**

Muito agradecemos à FINEP e PETROBRÁS, por ter financiado este trabalho, via projeto FINEP/CTPETRO (UENF PETRÓLEO E GÁS). O primeiro e terceiro autores agradecem ao Parque de Alta Tecnologia – TECNORTE pelas bolsas concedidas.

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 THOMAS, J.E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001. p. 77.
- 2 GAVITO, D. G. Cutting Mechanics Modeling for Polycrystalline Diamond Compacts and Extension to the Drill Bit. 1998. PhD Dissertation – University of Tulsa, 1998. p. 217p.
- 3 LIMA, F.T.C. Study of the Diamond 5%wt- Cobalt Sintering under the HPHT Lowest Limit. In: THIRD LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON POWDER TECHNOLOGY. p. 891-899, 2003.
- 4 BERMAN, R. Physical Properties of Diamond, 2ed. London, 1986. p. 250.
- 5 REEDHYCALOG Manuals. Fixed Cutter. Disponível on-line <<http://www.reedhycalog.com>>.
- 6 BAI, Q.S. Study on Wear Mechanisms and Grain effects of PDC Tool in Machining laminated Flooring. Int. J. Refract. Metals and Hard Mater. v.22, p.11-115, 2004.
- 7 OHNO, T. Cost Reduction of Polycrystalline Diamond Compact Bits Through Improved Durability. Geothermics, v.31, p.245-262, 2002.
- 8 MACIEL, M.F. Caracterização de Pastilhas de Diamante Policristalino Aplicadas em Brocas de Perfuração. Dissertação de Mestrado-PPGECM/UENF, 1988. p. 97.
- 9 COOPER, G. The Wear of Thermally Stable Diamond During Rock Cutting. Drilling Technology PD, v.56, p.181-186, 1994.
- 10 DENNIS, M., CLARK, D.A. Major PDC Bit Improvements in Mid 1980s. Oil and Gas Journal, v.28, p.62-68, 1987.
- 11 WILSON, J. K. Rotary Drilling – Making Hole, 2ed. Houston: Petex, 1983. p.180.
- 12 GLOWKA, D.A. Implications of Thermal Wear Phenomena for PDC Bit Design and Operation. Journal of Petroleum Technology - SPE 14222, p.1-16, 1985.
- 13 SNEDDON, M.V. Polycrystalline Diamond: Manufacture, Wear Mechanisms and Implications for Bit Design. Journal of Petroleum Technology - SPE 17006, p.1593–1601, 1988.

- 14 APPL, F.C. Measurement of Forces, Temperatures and Wear of PDC Cutters in Rock Cutting. *Journal of Petroleum Technology - SPE* 24398, p.231-238, 1991.
- 15 LI, X.B. Experimental Investigation on the Breakage of Hard Rock by the PDC Cutters with Combined Action Modes. *Tunneling and Underg. Space techn.*, v.16, p.107-114, 2001.
- 16 KAITKAY, P.; LEI, S. Experimental Study of Rock Cutting Under External Hydrostatic Pressure. *J. Mater. Proc. Techn.*, v.159, p. 206-213, 2005.
- 17 COELHO, R.T. Experimental and theoretical Study of the Temperature Distribution in Diamond Dressing Tools for Precision Grinding. *IDR*, v.3. p.186-193, 2001.