

## **Estudo do desgaste de cortadores PDC (Polycrystalline Diamond)**

Matos, M.R.<sup>I</sup>; Bobrovnitchii, G.S.<sup>I</sup>; Dias, C.A.<sup>I</sup>; Guimarães, R.S.<sup>I</sup>; Plácido, R.J.C.<sup>II</sup>; Filgueira, M.<sup>I</sup>

<sup>I</sup> Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Av. Alberto Lamego, 2000, 28013-620, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

e-mail: [mrang@uenf.br](mailto:mrang@uenf.br), [guerold@uenf.br](mailto:guerold@uenf.br), [cadias@uenf.br](mailto:cadias@uenf.br), [renansg@yahoo.com.br](mailto:renansg@yahoo.com.br), [marcello@uenf.br](mailto:marcello@uenf.br)

<sup>II</sup> CENPES/PETROBRAS – Cidade Universitária, Quadra 07, 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

e-mail: [jcrp@cenpes.petrobras.com.br](mailto:jcrp@cenpes.petrobras.com.br)

---

### **RESUMO**

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). Face à questão estratégica industrial, poucos estudos foram publicados sobre o processamento e caracterização destas ferramentas. Neste tocante, este trabalho visa o estudo da influência de alguns parâmetros de corte no desgaste dos cortadores PDC, simulando a situação de corte, quais sejam: forças sobre o cortador, temperatura na zona de corte, rotação da mesa de granito e ângulo de corte. Correlacionando estes parâmetros, descobrem-se quais deles 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 melhores resultados, foi 15kgf/30rpm/10°, onde se obtiveram-se os menores valores de desgaste – 0,00002g.

**Palavras-chaves:** Pastilhas PDC, desgaste, diamantes sinterizados, ensaios de corte.

---

## **Study on the wear of PDC (Polycrystalline Diamond)**

### **ABSTRACT**

PCD bits (poly-crystalline diamond) are composites in which the hardmetal (WC/Co) base absorbs the impact loading, thus increasing the PCD lifetime. The bit is processed by the high pressure – high temperature sintering (HPHT) of a mixture monocrystalline of diamond powders 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 in a cutting and abrasion physical simulator, wich are: loads on the bits, cutting edge temperature, granite base rotation, and bit cutting angles. In this work, the smoothest wear condition was 15kgf/30rpm/10° - 0.00002g.

**Keywords:** PDC bits, sintered diamonds, cutting tests.

---

## **1 INTRODUÇÃO**

Em conformidade com Thomas [1], 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 [2], as brocas PDC tornaram-se um padrão de ferramenta com preferência 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) [3]. 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 [4] avalia o

diamante como um dos componentes principais das pastilhas diamantadas, tendo papel relevante no desempenho das brocas PDC. Graças às propriedades únicas desse elemento, foi possível o aumento efetivo da vida útil de vários tipos de ferramentas de corte.

Nas referências [5 - 7], verifica-se que os cortadores PDC têm um chanfro ao redor da periferia da face cortante para aumentar a resistência ao impacto inicial. Assim, para evitar qualquer dano prematuro potencial para o diamante, a zona de corte do PDC deve apresentar um chanfro periférico que seja pequeno, mas reduza 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 à broca funcionar por mais tempo [8]. Altas taxas de penetração e aumento do tempo na perfuração têm resultado em economias significantes no custo da perfuração quando comparado a outros tipos de brocas em determinadas situações de perfuração [7]. Os fatores mecânicos, carga na broca e sua rotação, devem ser coordenados com a seleção da ferramenta, com o propósito de aperfeiçoar-se a taxa de perfuração [9, 10]. De acordo com Wilson [11], um aumento da carga na broca ou na sua rotação irá aumentar a taxa de penetração. Segundo Glowka [12], uma baixa velocidade de rotação e uma elevada carga na broca contribuem para aumentar a vida útil da ferramenta, desde que tal carga 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 [13] 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 [6]. 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 à 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) [6, 8].

As pastilhas PDC são aplicadas na perfuração de poços de óleo e gás com litologia caracterizada por presença de rochas médias [1, 2]. 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 [14]. Várias técnicas estão sendo propostas e testadas objetivando melhorar o desempenho das brocas, principalmente na perfuração de rochas duras [2, 7, 15, 16].

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% [2].

Um estudo das novas técnicas de perfuração de rochas duras [2] indicou a necessidade de desenvolvimento de um sistema de testes para as pastilhas PDC aplicadas nas brocas de perfuração, que possibilite a regulagem, 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 investigar o desempenho de pastilhas PDC, utilizadas em brocas de perfuração de rochas médias a duras, em termos do desgaste das pastilhas, de forma aproximada à situação real de corte.

## 2 METODOLOGIA

Para a realização dos testes de desgaste 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.

Como material de corte, usou-se um granito cinza, com estrutura orientada, de granulometria variando de 4 a 20mm. Tal granito foi classificado petrograficamente como Biotita Monzogranito, que contém 32% em peso (p) de quartzo, 31%p de microclina micropertítico, 24%p de plagioclásio, 11%p de biotita, e 2%p de acessórios que apresentam massa específica de 2,67g/cm<sup>3</sup>, absorção d’água de 0,35%, e porosidade total de 0,93%. Os corpos de prova, em forma de discos, foram preparados com diâmetro externo de 70cm, e altura de 5cm. Estes discos (um para cada condição de ensaio) foram instalados horizontalmente na base de um 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 a um 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 PDC) e montadas verticalmente ao disco de granito (o qual pode ser entendido como corpo de prova) – de agora em diante, denominado mesa. 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 ref. [17], que faz uso de um pirômetro óptico focado no ponto de contato entre os dois materiais (pastilha e mesa), permitindo a leitura da temperatura da zona de corte e comparação com a temperatura lida na lateral da pastilha PDC, via termopar acoplado. A calibração foi realizada através de curvas de ambas temperaturas, ao longo do tempo.

Para a realização de testes de corte não se fez uso de líquido refrigerante e pressurização de espuma lubrificante (varia de 60 a 150MPa), usando-se rotações de 20, 30 e 40rpm do disco de granito, rotações estas utilizadas em face ao uso destes valores na perfuração de poços de óleo e gás com brocas PDC. Foram empregadas cargas verticais (peso solto) de 10 e 15 kgf sobre as pastilhas. Na indústria petrolífera, é usual a carga mínima de 150kgf sobre cada broca PDC. Entretanto, por uma razão de limitação do sistema de simulação utilizado, foram empregadas cargas menores. Uma vez posicionadas sobre o disco de granito, as pastilhas PDC também se deslocam no sentido radial, com avanço fixo de 5 mm/min. A profundidade de corte no disco de granito (desgaste da mesa), indicada por um LVDT que é acoplado ao eixo de fixação do suporte das pastilhas PDC, bem como a temperatura lida diretamente na pastilha PDC via termopar, foram registrados em tempo real durante 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, com precisão de 0,00001g. Os ensaios foram realizados em trépica, de forma que os resultados são relativos a valores médios. A microestrutura de pastilhas desgastadas foi examinada ao MEV, um sistema Zeiss 962.

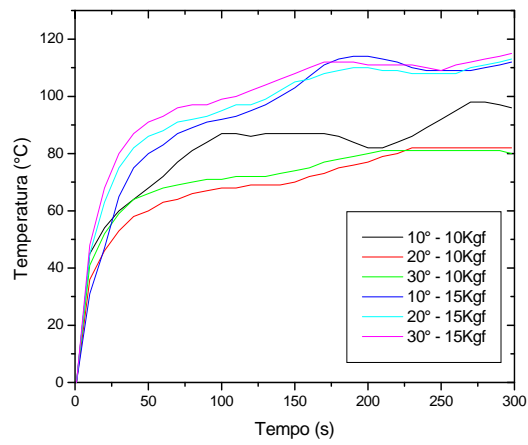
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Figura 1(a-c), ao aumentar a carga sobre o cortador, a temperatura nas proximidades da ferramenta aumenta. O ângulo de corte e a rotação da mesa, considerando a carga de 10kgf, não promovem sensível influência na temperatura gerada nas pastilhas PDC, já que são alcançadas temperaturas próximas, para qualquer rotação utilizada, excetuando a rotação de 40rpm – a qual promove um aumento da temperatura, de 100 para 120°C. Ao aumentar a carga sobre as pastilhas, seu atrito contra os corpos de prova de granito também aumenta, uma vez que aumenta a área de contato, pela maior penetração da pastilha PDC no corpo de prova. Nota-se também que o aumento da rotação aumenta a temperatura nas proximidades da ferramenta. 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. A explicação também reside no aumento da área de contato, o que foi também verificado por Gavito [2].

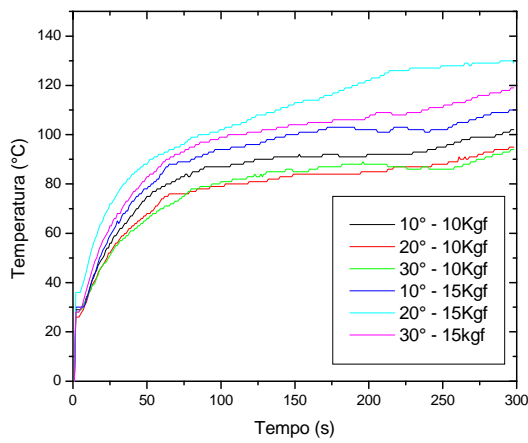
Na Figura 1(a-c), observa-se aumento da temperatura medida nas proximidades das pastilhas PDC, com o aumento da rotação do disco de granito. As temperaturas evoluem de 80 para 100°C, para carga vertical sobre a pastilha PDC de 10kgf, e de 110 para 160°C, para carga de 15kgf. Ou seja, variando-se a rotação de 20 a 40RPM para carga de 10kgf, não há qualquer efeito significativo sobre a temperatura gerada. Já para a carga aplicada de 15kgf, observa-se um aumento de temperatura da ordem de 30%. 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, mas a mesma tendência foi observada por Gavito [2], 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. É oportuno informar que os efeitos de ruído “pico e vale” observados nestas curvas, devem-se, fundamentalmente, aos saltos das pastilhas PDC sobre a mesa, em decorrência do contato desta com os grãos duros de quartzo.

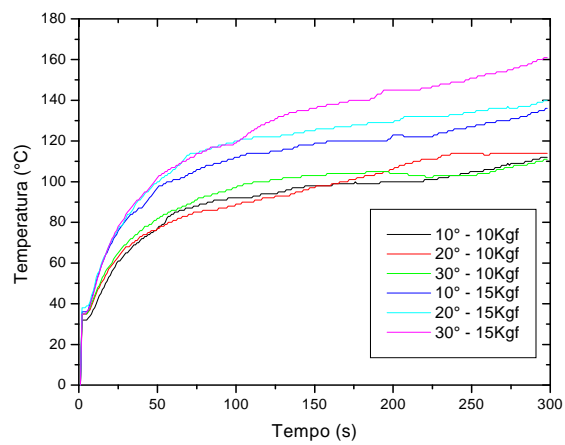
Com a rotação da mesa em 30rpm, para a carga vertical de 15kgf, o desgaste da mesa de granito foi o mesmo, independentemente do ângulo de corte utilizado, alcançando-se o valor mediano de 0,90mm (desconsiderando o ruído ora comentado), como pode ser visto na Figura 3(b). Quando a carga sobre a pastilha 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.



(a)



(b)



(c)

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

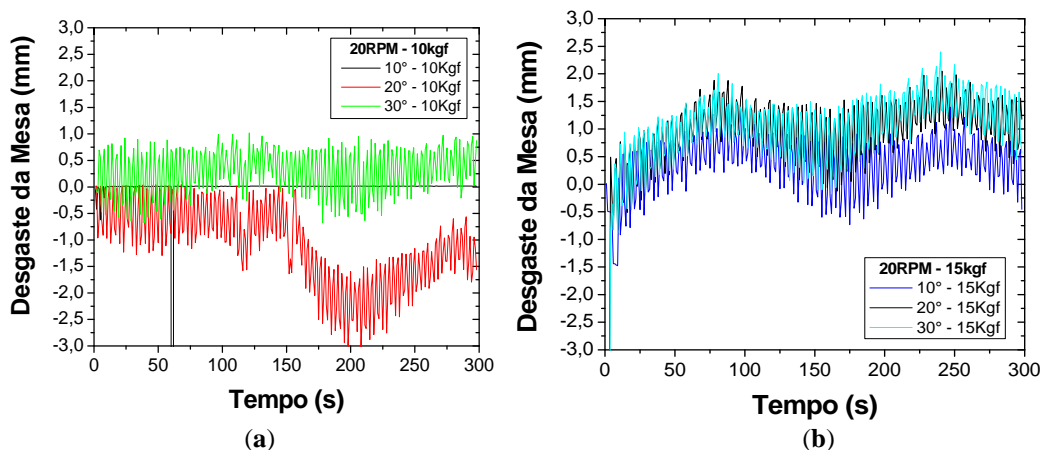


Figura 2: Desgaste da Mesa de Granito via rotação a 20rpm. (a) 10kgf e (b) 15kgf.

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.

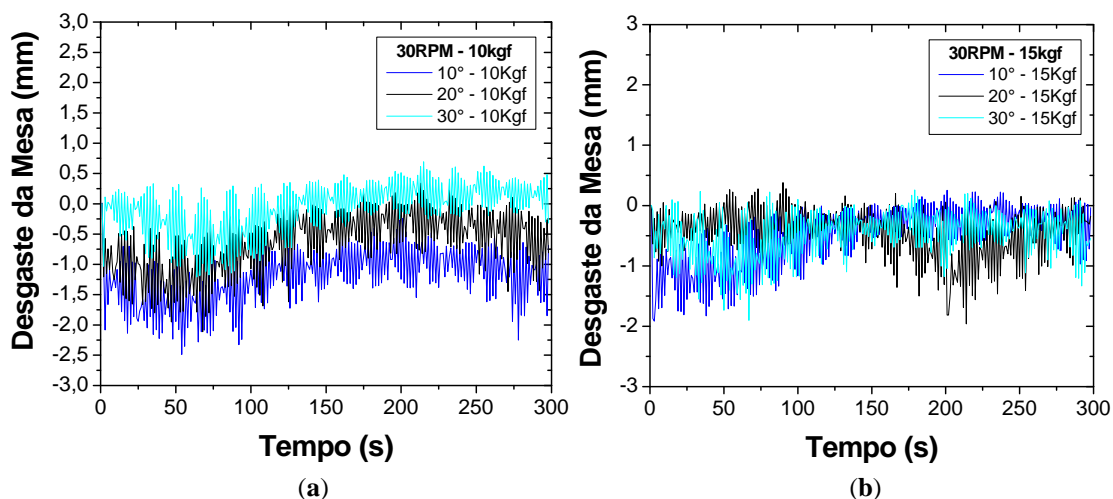


Figura 3: Desgaste da Mesa de Granito via rotação a 30rpm. (a) 10kgf e (b) 15kgf.

Diante disto, observa-se que a condição que gera maior profundidade de corte, para o mesmo intervalo de tempo, ocorre mediante a aplicação de 15kgf 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, faz-se necessário o emprego de cargas elevadas e rotações baixas, em conformidade com a literatura [1, 2, 12, 13]. Vale também informar que, em consonância com o descrito acima, o uso da rotação 20rpm e carga 15kgf resulta em menor temperatura na pastilha PDC em relação a rotações mais elevadas.

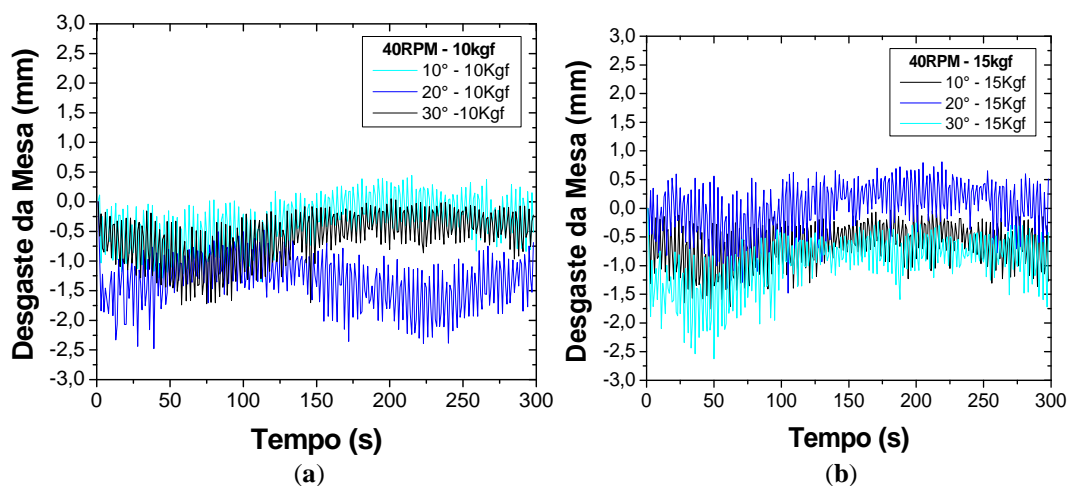
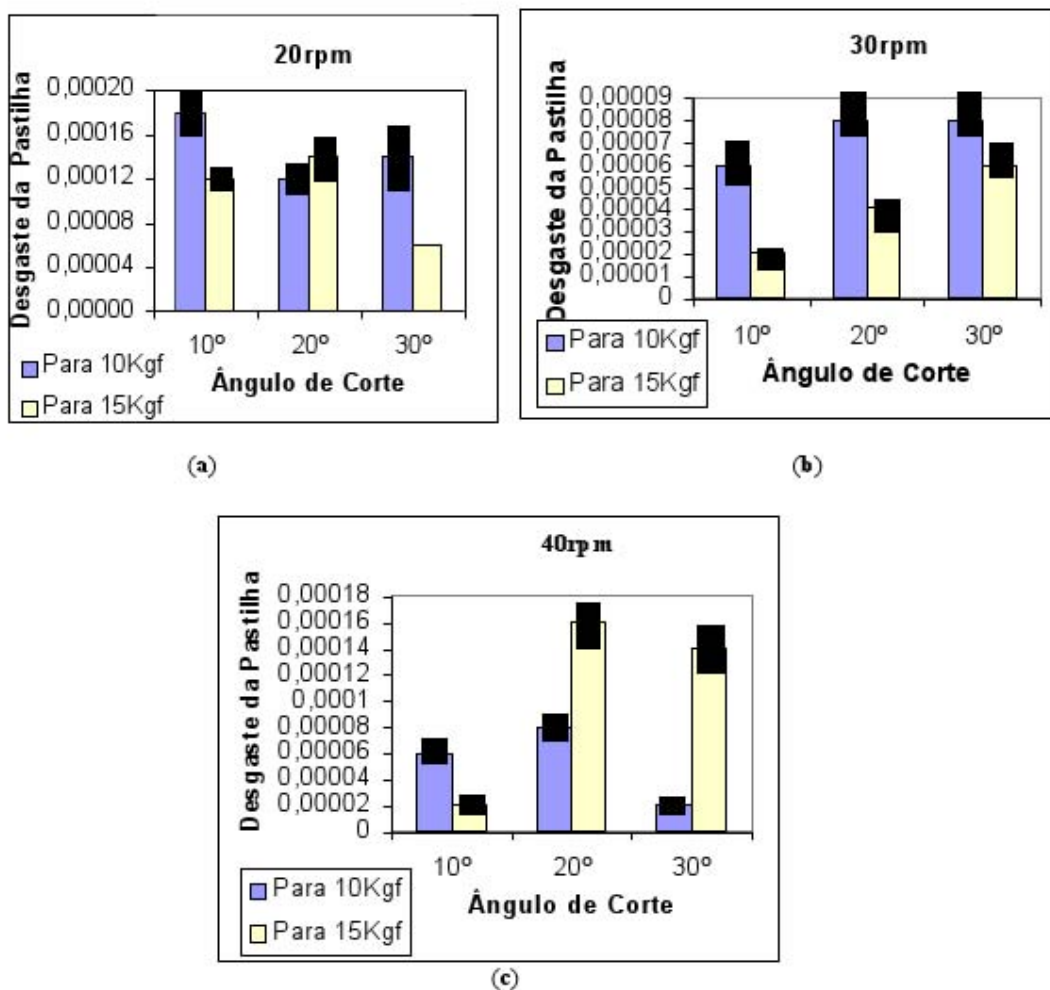


Figura 4: Desgaste da Mesa de Granito a 40RPM. (a) 10kgf e (b) 15kgf.

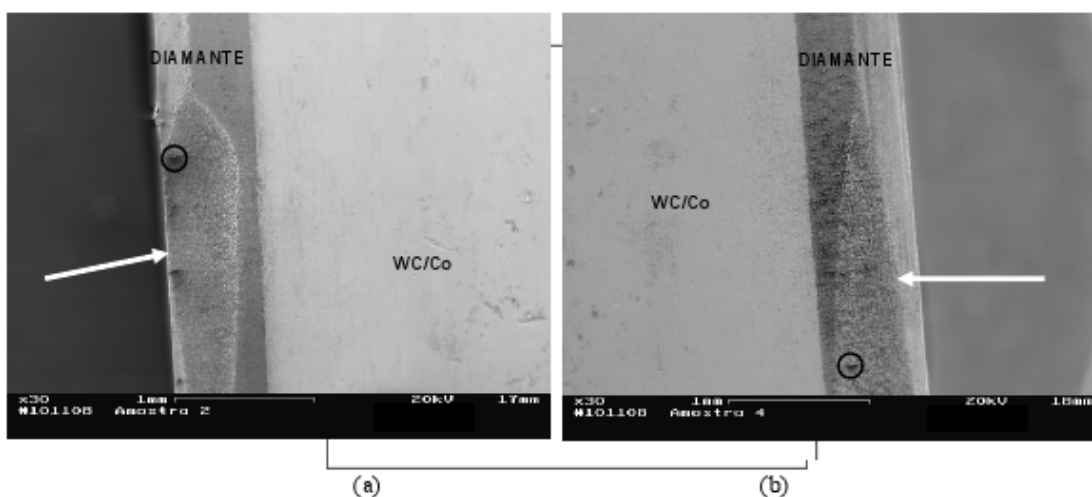
Na Figura 5, pode-se claramente observar que para a rotação da mesa de granito em 20rpm, os melhores resultados de corte com as pastilhas PDC ocorrem para a carga vertical de 15kgf e ângulo de corte de 30°. Já para a rotação de 40rpm, a melhor situação ocorre para a carga de 15kgf e ângulo de corte de 10°. Isto indica que ocorre uma nítida inversão do ângulo de corte influente no desgaste das pastilhas PDC, fato que está em plena concordância com os resultados obtidos por Gavito [2] 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 faz-se 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 as Figuras (6a e 6b) 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 5b informa que o desgaste para as amostras ensaiadas à 10kgf é da ordem de três vezes superior às ensaiadas à 15kgf. Os círculos mostram pequenos cavacos, oriundos da mesa de desgaste de granito.

Frete a estes resultados aqui obtidos, considerando os parâmetros adotados, observa-se que apesar da carga aplicada de 15kgf promover a geração de temperaturas mais elevadas nas pastilhas PDC, fornece maiores valores de profundidade de corte (desgaste do disco de granito - mesa), 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 [3]. Quanto à rotação, 20rpm propicia maior profundidade de corte (1,00mm) juntamente com a aplicação de carga de 15kgf. 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°.



**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 sete valores.



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

#### 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho exploratório, conclui-se que o uso do simulador físico foi de fundamental importância para parametrizar as variáveis que propiciaram as melhores condições de corte com as pastilhas PDC. A única limitação foi o emprego de cargas de ensaio da ordem de 10 vezes inferiores às utilizadas nas

operações de perfuração de poços de óleo e gás. 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.

## 5 AGRADECIMENTOS

Muito agradecemos à FINEP e PETROBRÁS, por ter financiado este trabalho, via projeto FINEP/CTPETRO (UENF PETRÓLEO E GÁS).

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] THOMAS, J.E., *Fundamentos de engenharia de petróleo*, 1 ed., Rio de Janeiro, Ed. Interciência, pp. 77, 2001.
- [2] GAVITO, D.G., “Cutting mechanics modeling for polycrystalline diamond compacts and extension to the drill bit”, PhD Dissertation, University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, USA, pp. 217, 1998.
- [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*, pp. 891-899, 2003.
- [4] BERMAN, R., *Physical properties of diamond*, 2ed., London, pp. 250, 1986.
- [5] REEDHYCALOG MANUALS, Fixed Cutter, <http://www.reedhycalog.com>. Acessado em setembro de 2006.
- [6] BAI, Q.S., “Study on wear mechanisms and grain effects of PDC tool in machining laminated flooring”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 22, pp. 11-115, 2004.
- [7] OHNO, T., “Cost reduction of polycrystalline diamond compact bits through improved durability”, *Geothermics*, v. 31, n. 2, pp. 245-262, 2002.
- [8] MACIEL, M.F., *Caracterização de pastilhas de diamante policristalino aplicadas em brocas de perfuração*, Dissertação de M.Sc., PPGECM/UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, 1988.
- [9] COOPER, G., “The wear of thermally stable diamond during rock cutting”, *Drilling Technology PD*, v. 56, n. 4, pp. 181-186, 1994.
- [10] DENNIS, M., CLARK, D.A., “Major PDC bit improvements in Mid 1980s”, *Oil and Gas Journal*, v. 28, n. 1, pp. 62-68, 1987.
- [11] WILSON, J.K., *Rotary Drilling – Making Hole*, 2ed., Houston, Petex, pp.180, 1983.
- [12] GLOWKA, D.A., “Implications of thermal wear phenomena for PDC bit design and operation”, *Journal of Petroleum Technology - SPE 14222*, n. 50, v. 4, pp.1-16, 1985.
- [13] SNEDDON, M.V., “Polycrystalline diamond: manufacture, wear mechanisms and implications for bit design”, *Journal of Petroleum Technology - SPE 17006*, n. 53, v. 2, pp.1593–1601, 1988.
- [14] APPL, F.C., *et al.*, “Measurement of forces, temperatures and wear of PDC cutters in rock cutting”, *Journal of Petroleum Technology - SPE 24398*, n. 56, v. 14, pp.231-238, 1991.
- [15] LI, X.B., “Experimental investigation on the breakage of hard rock by the PDC cutters with combined action modes”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, v.16, n. 2, pp. 107-114, 2001.
- [16] KAITKAY, P., LEI, S., “Experimental study of rock cutting under external hydrostatic pressure”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 159, n. 2, pp. 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, n. 61, pp. 186-193, 2001.