

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DOS LIGANTES A BASE DE COBALTO SOBRE A EFICIÊNCIA DA FERRAMENTA DIAMANTADA PARA CORTE DE PEDRAS¹

Guerold Sergueevitch Bobrovnitchii²

Marcello Filgueira³

Rômulo Crespo Tardim⁴

Resumo

Até o presente momento, as serras circulares diamantadas destinadas ao corte de pedras, principalmente granito, são fabricadas via metalurgia do pó, utilizando ligantes a base de cobalto. A preferência pelo cobalto como base para ligantes em ferramentas que sofrem alta sollicitação mecânica se justifica pelo fato de ser um metal tecnológico, possuir propriedades físico-mecânicas adequadas, alta molhabilidade e adesão dos grãos de diamante. Além disso, o cobalto não provoca a grafitação do diamante a temperaturas de até 1000° C. A ajuda de um método de planejamento matemático auxiliará no estudo da influência de dopantes no ligante de cobalto sobre o desgaste dos setores diamantados das serras circulares e outras propriedades físico-mecânicas do material compósito “diamante-cobalto-dopante”. Como dopantes são utilizados Cr, Si, Ni e Fe. Foram construídos modelos matemáticos que mostram a dependência entre a dureza do ligante a base de cobalto, a resistência à flexão e ao desgaste dos segmentos, e as condições de fabricação dos segmentos. Os testes consistiram no corte de granito.

Palavras-chave: Diamante; Metalurgia do pó; Desgaste; Disco de corte

THE INFLUENCE OF COBALT-BASED BINDERS COMPOSITION ON THE EFFICIENCY OF DIAMOND SAW BLADES

Abstract

Powder metallurgy-based production technologies of saw blades for stone cutting make use of cobalt binders. Cobalt was chosen for that purpose because it provides high physical-mechanical properties, great wettability and adhesion between dispersed diamond particles. Besides its excellent physical properties, cobalt also shows a positive behavior not collaborating to graphitization of diamond in temperatures up to 1000° C. In this work, a mathematical support was used to study the influence of doping agents on cobalt-based binders, its consequences over the wear resistance of saw blades, and other physical-mechanical properties of the composite material “diamond-cobalt-doping agent”. Cr, Si, Ni and Fe were used as doping agents. The tests were carried out by cutting granite.

Key words: Diamond; Powder metallurgy; Wear; Cutting disc

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Professor Emérito do SMSD/LAMAV - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil. CEP 28013-600.*

³ *Professor Associado do SMSD/LAMAV – UENF.*

⁴ *Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UENF.*

1 INTRODUÇÃO

A maioria das serras para corte de rochas, principalmente pedras ornamentais, são equipadas com elementos de corte chamados segmentos. Estes elementos são compostos de partículas de diamante e ligante metálico, sendo o cobalto a base mais comum para formação desta liga. Durante o processo de fabricação de tais segmentos, o método da metalurgia do pó é realizado em moldes de grafite com aplicação de pressão. Tal processo confere às ferramentas propriedades altamente exploratórias.

A utilização do cobalto como base do ligante da ferramenta de corte é justificada pela sua capacidade tecnológica e suas altas propriedades físico-mecânicas ($\sigma_{es} = 280$ MPa; HB = 125). Além disso, o cobalto molha e adere muito bem as partículas de diamante, grafitizando-as somente sob aquecimento a temperaturas no intervalo de 900°C -1100°C.⁽¹⁾

Atualmente, o cobalto puro é raramente utilizado na fabricação dos segmentos diamantados. Algumas pesquisas⁽²⁾ recomendam que seja adicionado ferro, carbeto, níquel, cobre, silício etc.

Quando adicionados, ferro e níquel possuem a característica de elevar a resistência mecânica do ligante, aumentando as temperaturas envolvidas no processo de fabricação. De comportamento contrário, cobre e estanho diminuem a temperatura de fabricação das ferramentas, protegendo o segmento da interação com o grafite do molde. O carbeto de cromo eleva a dureza do ligante e, aparentemente, é bem molhado pelos outros componentes. Já o silício possui outras aplicações. Sua adição influencia as propriedades tribológicas e mecânicas do ligante, melhorando a adesão entre ligante e diamante.⁽³⁻⁵⁾

Observa-se que a baixa resistência ao desgaste da ferramenta (consumo elevado dos diamantes), durante o corte de granito, é fortemente indicada pela resistência ao desgaste do ligante. Nesse caso, o ligante terá pouca dureza e resistência mecânica baixa. De outro lado, quando o material do ligante possui altíssima resistência ao desgaste, os segmentos perdem a sua eficiência no corte, espelhando a superfície de contato e aumentando o ruído emitido.⁽⁶⁾

Pesquisar a influência da composição do ligante e das condições de fabricação dos segmentos por compactação a quente sobre a resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste das serras circulares, além da ligação entre estes parâmetros, é uma tarefa técnica de complexidade enorme.

No presente trabalho pretende-se utilizar o método do planejamento matemático de experimentos, com realização de réplicas fracionárias 2^{6-3} ,^(7,8) em uma tentativa de realizar a tarefa acima citada. O estudo visa determinar a influência da composição do ligante a base de cobalto e as condições de sua sinterização sobre a sua resistência estática sob flexão, dureza e resistência ao desgaste durante o corte do granito, além das relações entre todos os parâmetros citados.

2 PARTE EXPERIMENTAL

Foram selecionados os fatores que mais influenciam no funcionamento eficiente dos setores diamantados na serra de corte com 350 mm de diâmetro:

- Composição do ligante: teores de carbeto de cromo, X_1 ; silício, X_2 ; níquel, X_3 ; ferro, X_4 ;

- Temperatura de sinterização, X_5 ;
- Tempo de sinterização, X_6 .

A matriz de planejamento, a grandeza dos fatores escolhidos, os intervalos de variação, e as condições de realização dos experimentos são apresentados na Tabela 1. Para os experimentos, foram utilizados os seguintes materiais:

- Pós de diamante, de produção própria, com granulometria de 400/315 μm ;
- Pós de Co, Si, Fe, Ni, Cr_3C_2 com granulometria entre 40 μm e 28 μm ;
- Teor de Cu e Sn de 8 e 2%, respectivamente, para cada amostra.

Tabela 1. Matriz do planejamento.

Níveis da variação	Fatores de variação					
	Composição dos ligantes, % massa				t, min	T, °C
	Cr_3C_2	Si	Ni	Fe		
Nível Básico	16	1	10	12	t_b	T_b
Intervalo da variação	2	1	5	8	Δt	ΔT
Nível superior (+1)	18	2	15	20	$t_b + \Delta t$	$T_b + \Delta T$
Nível Inferior (-1)	14	0	5	4	$t_b - \Delta t$	$T_b - \Delta T$
Fatores Exp. n°	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	-	-	-	-	-	-
2	+	-	+	-	-	+
3	+	-	-	+	+	-
4	-	+	+	-	+	-
5	-	+	-	+	-	+
6	+	+	+	+	-	-
7	+	+	-	-	+	+
8	-	-	+	+	+	+

Para cada experimento mostrado na Tabela 1 foi preparada uma mistura diferente de pós. A concentração de diamante na mistura não superou $50 \pm 1,5\%$. As misturas foram pesadas antes do tratamento em um misturador rotativo universal, e novamente antes da compactação na matriz de grafite. A matriz de grafite possui seis orifícios com seção retangular correspondente às dimensões do setor da serra.

Em cada orifício é inserido um pistão inferior de grafite, a mistura de pós de diamante, cobalto e elementos complementares citados na Tabela 1, e o pistão superior de grafite. Em um orifício para controle foi colocada a mistura diamante+cobalto (Dia+Co). A matriz é instalada dentro da prensa de 40 toneladas de força com o apoio de suportes laterais. O processo de sinterização foi realizado sob a pressão de $35,0 \pm 0,5$ MPa em cada pistão, e temperaturas variáveis. A precisão da medição das temperaturas feitas pelo termopar tipo cromel-alumel foi de $\pm 3^\circ \text{C}$.

Para avaliar a dureza e a resistência mecânica do ligante sob flexão, foram preparadas amostras sem a presença de diamante. A dureza HRC e resistência à flexão, σ_f , foram medidas em conformidade com metodologias já conhecidas.

A avaliação da resistência ao desgaste foi feita no dispositivo “Abrasímetro”, fabricado pela empresa CONTENCO. O teste consiste no corte de um anel de granito por um único setor, o qual é fixado rigidamente. O valor do desgaste é apresentado pela correlação entre perda da massa de diamante (quilates) e quantidade de granito desagregado.

3 RESULTADOS

A realização dos experimentos da matriz de planejamento apresentada auxiliou na elaboração das equações necessárias para posterior avaliação dos compactos obtidos.

A dureza é calculada pela seguinte equação:

$$H = 42,0 + 2,2 \cdot X_1 + 1,11 \cdot X_2 - 1,31 \cdot X_3 + 2,1 \cdot X_4 + 1,4 \cdot X_5 + 2,7 \cdot X_6 \quad (1)$$

Tomando como referência a magnitude do coeficiente $\delta_i = \pm 1,55$, a Equação 1 transforma-se em:

$$H = 42,0 + 2,21 \cdot X_1 + 2,1 \cdot X_4 + 2,7 \cdot X_6 \quad (2)$$

Tabela 2. Resultados dos testes em conformidade com a Tabela 1.

Exp. n°	Dureza, HRC	Resistência à flexão, MPa	Desgaste, ct/g	Observações
1	36,0	920,0	3,20	Corte rígido com aquecimento intensivo
2	38,0	880,0	2,70	Corte suave com aquecimento
3	44,0	1280,0	2,80	Corte rígido com pedaços
4	28,0	865,0	2,62	Corte rígido com aquecimento intensivo
5	50,0	1380,0	2,73	Corte suave com aquecimento
6	41,0	1205,0	2,75	Corte rígido com aquecimento intensivo
7	40,0	890,0	2,10	Corte suave com aquecimento
8	42,0	1306,0	2,25	Corte rígido com aquecimento intensivo

A equação 2 é adequada e mostra que, em limites pré-estabelecidos, o teor do Si, Ni e tempo de manutenção da temperatura não influenciam sobre a dureza do ligante. Por outro lado, influência significativa possui o teor do Cr_3C_2 e Fe, e também a temperatura de sinterização. O aumento destas grandezas implica também no aumento da dureza do ligante.

A resistência à flexão pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\sigma_f = 93 - 6,3 \cdot X_1 - 0,9 \cdot X_2 - 0,7 \cdot X_3 + 9,7 \cdot X_4 \quad (3)$$

Tomando como referência a grandeza do coeficiente $\delta_i = \pm 3,9$, a Equação 3 transforma-se em:

$$\sigma_f = 93 - 6,3 \cdot X_1 + 9,7 \cdot X_4 \quad (4)$$

A Equação 4 é também adequada e mostra que, em limites escolhidos, o teor de Si e Ni, e também da temperatura e tempo do aquecimento não influenciam sobre a resistência do segmento. Para aumento da resistência é necessário diminuir o teor do Cr_3C_2 e aumentar o teor de Fe.

O desgaste dos setores durante o corte de granito é descrito pela equação:

$$M = 2,6 - 0,02 \cdot X_1 - 0,05 \cdot X_2 - 0,07 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_4 - 0,16 \cdot X_5 - 0,18 \cdot X_6 \quad (5)$$

O intervalo da grandeza dos coeficientes δ_i é $\pm 0,092$. Considerando isso, a equação se transforma em:

$$M = 2,6 - 0,16 \cdot X_5 - 0,18 \cdot X_6 \quad (6)$$

A Equação 6 mostra que a introdução dos elementos Cr_3C_2 , Si, Ni e Fe, nos limites escolhidos, não influencia positivamente a resistência ao desgaste dos segmentos. Por isso, a resistência depende das condições de fabricação. Da Equação 6, tem-se que para o aumento da resistência é necessário aumentar a temperatura (X_6) de aquecimento (até a temperatura do início da grafitação do diamante) e o tempo de manutenção da temperatura (X_5).

Dados da análise da Equação 6 foram justificados experimentalmente pelos resultados dos testes dos segmentos diamantados com teor de cobalto puro. Estes segmentos de controle foram obtidos com temperaturas variáveis de sinterização. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado dos testes dos segmentos diamantados ligados por cobalto puro.

Temperatura de sinterização, °C	Dureza do ligante, HRC	Resistência à flexão, MPa	Desgaste durante 10 min, g/kg
T_b-140	33	1720	$1,6 \pm 0,2$
T_b+40	21	1460	$1,1 \pm 0,1$

4 DISCUSSÃO

O aumento da temperatura de sinterização muda o caráter do processo de corte do granito. Através da Tabela 3 é visto que os segmentos sinterizados à temperatura acima da temperatura básica, T_b , cortaram melhor o granito, se comparados aos obtidos sob temperatura baixa.

A comparação dos coeficientes δ_i nas Equações 2, 4 e 6 mostra que os fatores X_1 (teor de Cr_3C_2) e X_4 (teor de Fe) possuem influência decisiva sobre a resistência e dureza do ligante a base de cobalto com dopantes, e praticamente não influenciaram sobre a resistência ao desgaste da ferramenta. Isto dá a possibilidade de afirmar que a

dureza do ligante de cobalto e sua resistência à flexão nos limites estudados (de 28 HRC até 50 HRC, e de 865 MPa até 1.380 MPa), e valores próximos destes, não têm influência significativa para a resistência ao desgaste.⁽⁷⁾ Por esta razão, é necessário rejeitar a hipótese da influência positiva da temperatura sobre a resistência ao desgaste do ligante, na Equação 2. As altas propriedades físico-mecânicas do ligante podem ser obtidas diminuindo a temperatura da sinterização por conta da variação do teor Cr_3C_2 e Fe, tal como indicado pelas Equações 2 e 4.

Os testes dos segmentos “Dia-Co” revelaram que mesmo possuindo dureza relativamente baixa, apresentam alta resistência ao desgaste, 2,5 vezes maior do que apresentado na Tabela 2, sendo que os segmentos com maior resistência ($\sigma_f = 1720$ MPa) apresentou menor resistência ao desgaste.

As conclusões obtidas com base na Equação 6 foram justificadas pelos resultados dos testes dos segmentos feitos de “Dia-Co”, e fabricados sob temperaturas variáveis de prensagem a quente (Tabela 3).

Dessa forma, a resistência ao desgaste é maior quando a temperatura de sinterização é alta. Pode ser proposto que este aumento da temperatura e do tempo de sinterização do ligante de Co é garantido pelo aumento da força de adesão dos diamantes no sistema “Dia-Co”, e o aumento da superfície de contato entre diamante e ligante.

O aumento da adesão das partículas de diamante no ligante pelo aumento da temperatura é justificado indiretamente por alguns fenômenos marcados durante a fabricação e testes dos segmentos diamantados:

- a) A resistência à flexão dos segmentos sem e com diamantes fabricados sob temperatura um pouco mais alta do que o nível básico, T_b é muito próxima. Os segmentos obtidos sob temperatura mais baixa do que T_b ($T_b-140^\circ \text{C}$) apresentaram resistência à flexão 1,5 a 2 vezes mais alta quando comparados com os segmentos diamantados fabricados sob a mesma temperatura. A formação de camadas mais espessas de ligante entre partículas de diamante é a responsável mais provável por este fato;
- b) Durante a sinterização sob a temperatura acima de T_b , foi observada a brasagem do ligante nos pistões de grafite;
- c) Os segmentos fabricados sob a temperatura um pouco elevada ($T_b+40^\circ \text{C}$) apresentam perda de 9% a 12% dos diamantes, enquanto os segmentos obtidos sob a temperatura ($T_b-140^\circ \text{C}$), perdem de 15% a 20%.

5 CONCLUSÕES

Utilizando o método de planejamento matemático dos experimentos, foram criados modelos matemáticos que descrevem, em limites definidos, a dependência entre resistência à flexão e resistência ao desgaste de segmentos diamantados das serras para o corte do granito, de composição e condições de fabricação dos segmentos por método de sinterização via metalurgia de pó. Foi mostrado que a adição de alguns elementos tanto metálicos quanto não-metálicos não influi positivamente sobre a resistência ao desgaste dos segmentos diamantados com ligante de cobalto das serras para corte das pedras.

A resistência ao desgaste dos segmentos diamantados a base de cobalto e dopantes, não depende da dureza do ligante e da sua resistência mecânica à flexão. É

possível propor que esta característica talvez dependa das condições de sinterização e do aumento da temperatura que, provavelmente, está ligada com o aumento da adesão das partículas de diamante no ligante. Esta também tem que ser ligada com a diminuição de espessura de camadas dos ligantes entre partículas de diamante.

Os estudos realizados não levaram em consideração a influência da pressão de compactação sobre a eficiência do funcionamento dos segmentos diamantados das serras. Sabendo que a pressão aumentada pode diminuir as espessuras das camadas de ligante entre partículas de diamantes, é esperado um melhor desempenho dos diamantes em qualquer composição do ligante.

REFERÊNCIAS

- 1 STOCKWELL, B.H. Micro-matrix powders, the metallurgy of diamond tools. Instambul: De Beers / Eskanazi Seminar, 1987.
- 2 KARAGÖZ, Z.M. Characterization of hot pressing behavior of diamond cutting tools. Spain: Int. PM Conf., 1998, p. 12.
- 3 Patente dos EUA n° 999962, pub. 28.12.1976.
- 4 Patente dos EUA n° 4018576, pub. 19.04.1977.
- 5 Patente da França n° 2240791, pub. 29.03.1974.
- 6 SEMIONOV, A.P. Atrito e interação do contato de grafite e diamante com metais e ligas. Moscou: Ed. Nauka, 1974, p. 191.
- 7 SILVA, V.F., CARVALHO, E.A., BOBROVNITCHII, G.S., FILGUEIRA, M. Compacting the composite Fe-Cu-Diamond. **Proceedings** of PM-2004, 2004, v. 1, p. 83-86.
- 8 JAYATILAKA, A.D., TRUSTRUMM, K.J. **Materials Science**, 1979, n. 14, p. 6.