

PROCESSAMENTO DE PÉROLAS DE FIOS DIAMANTADOS POR METALURGIA DO PÓ: NACIONALIZAÇÃO DA TECNOLOGIA ¹

Luciano José de Oliveira ²
Marcello Filgueira ³

Resumo

Os Fios Diamantados são ferramentas de corte aplicadas ao desmonte de rochas ornamentais, bem como a cortes de blocos de concreto, e podem ser utilizadas em substituição a serras em geral. Estas ferramentas são compostas de um fio alma (aço inoxidável), sobre o qual são dispostos segmentos anulares diamantados (pérolas diamantadas) igualmente espaçadas. Em geral, as pérolas de fios diamantados são processadas seguindo as técnicas da Metalurgia do Pó, onde se produz compósitos tendo como partícula abrasiva o diamante e normalmente um ligante metálico para aderir os diamantes. As pérolas diamantadas do presente trabalho foram produzidas via Metalurgia do Pó convencional, utilizando como matriz metálica ligante uma liga de Fe-20%pCu, com adição de 1% em peso de SiC. Foram feitas análises de retração/inchaço e microestrutural após a sinterização, testes de dureza Brinell e foi medida a resistência ao desgaste das pérolas aqui produzidas em confronto com as pérolas comerciais importadas. Os resultados indicam que conseguiu-se, além de gerar tecnologia de manufatura de pérolas de fios diamantados, processar pérolas de mesmo potencial abrasivo e de corte das pérolas comerciais importadas, o que sugere menor custo de produção e mostra ser viável a nacionalização de tal tecnologia.

Palavras-chave: Compósito diamantado; Sistema Fe-Cu; Pérolas diamantadas.

DIAMOND WIRES BEADS PROCESSING BY POWDER METALLURGY: TECHNOLOGY NACIONALIZATION

Abstract

Diamond wires are cutting tools used in the slabbing of dimension stones, such as marbles and granites, as well as in the cutting of concrete structures. This kind of tool consists of an AISI 316 stainless cable on which annular diamond segments (beads) are set up with gap between them. Normally, diamond wire beads are processed according with the Powder Metallurgy techniques (MP), which enables the processing of composites with metal matrix diamond embedded. The beads of the present work, had been produced by conventional Powder Metallurgy, using Fe-20wt%Cu alloy with addition of 1wt% of SiC as the matrix metallic bond. It was carried out shrinkage/swelling and microstructural analyses after sintering, Brinell hardness measurements, as well as the abrasion resistance of beads produced here in confrontation with that imported ones. The results indicate that it was achieved, besides generating technology in terms of diamond tools manufacture, to process beads with similar abrasion resistance and performance than those of the commercial diamond beads, what suggests a reduction in the production cost and it proves to be possible the nationalization of such technology.

Key words: Diamond composites; Fe-Cu system; Diamond beads.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Estudante de Doutorado do programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PPGECM) da UENF – Campos dos Goytacazes, RJ.*

³ *DSc. Engenharia e Ciência dos Materiais – Prof. Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PPGECM) da UENF – Campos dos Goytacazes, RJ.*

1 INTRODUÇÃO

As ferramentas diamantadas empregadas para o corte de rochas ornamentais, são compósitos constituídos de partícula de diamante embebidas numa matriz metálica ligante. Esses materiais são normalmente produzidos em grande escala pelas técnicas da Metalurgia do Pó e, abrangem uma larga escala de aplicações, como processamento de rochas, engenharia civil, etc. Atualmente, a maioria destas ferramentas são produzidas pela tradicional rota de prensagem a quente, que pode ser finalizada por infiltração metálica em alguns casos, mas também algumas destas ferramentas são produzidas por prensagem a frio e sinterização. Durante o processo, as partículas de diamante são ligadas à matriz metálica, por uma combinação de interações químicas e físicas, e se faz necessário um rígido controle dos parâmetros de processamento para evitar ataque, dissolução e/ou grafitização do diamante, o que pode afetar o desempenho final do corte.⁽¹⁾

As pérolas de fios diamantados, são segmentos anulares diamantados de diâmetro de 10 a 12 mm, as quais são montadas com espaçamento aproximado de 25 mm sobre um cabo multifilamentar de aço inoxidável, também chamado fio alma. Este conjunto compõe o fio diamantado, que são ferramentas de corte aplicadas ao desmonte de rochas ornamentais, tais como os mármore e os granitos, bem como a cortes de blocos de concreto e, podem ser usadas em substituição às serras em geral. As pérolas diamantadas são as partes mais importantes da ferramenta, pois por serem feitas a base de um compósito diamantado, são as responsáveis pela ação de corte.⁽²⁾ As pérolas diamantadas a base de diamantes impregnados são fabricadas via Metalurgia do Pó, onde a primeira etapa consiste da mistura do pó de diamante com o pó de metal ligante – geralmente tungstênio, cobalto, cobalto-bronze, ferro-cobalto – para formar o compósito diamantado.⁽³⁻⁸⁾ Na rota de obtenção das pérolas diamantadas via Metalurgia do Pó convencional, após a etapa inicial de mistura dos pós, procede-se com a prensagem uniaxial ou isostática a frio da mistura, obtendo um corpo “verde” de dimensões próximas a da futura pérola. Procede-se, então, com a sinterização, a qual garantirá a consolidação do corpo verde, e a obtenção de um volume anular (pérola) diamantado.^(9,10) Na rota de prensagem a quente, após a etapa de mistura, esta é vertida através de um dosador, dentro de orifícios de uma matriz, onde a mistura é prensada concomitantemente assistida por temperatura, ocorrendo a sinterização.⁽¹¹⁾

Normalmente, os diamantes utilizados no processamento de pérolas são de alta qualidade, ou seja, apresentam elevada tenacidade, condutividade térmica e dureza. O teor de diamantes pode variar de concentração 30 a 50, o que corresponde, respectivamente a, 0,26 e 0,44 gramas de diamante por cm³ de volume abrasivo, dependendo da dureza (e abrasividade) do material a ser cortado e da taxa de corte requerida ou desejada.⁽¹²⁾

A seleção dos metais ligantes, depende fundamentalmente da abrasividade e dureza do material a ser cortado. Normalmente usa-se tungstênio (W) para materiais de dureza extremamente elevada, tal qual o concreto. O cobalto (Co), ligas de W-Co para materiais de alta dureza como os granitos. Cobalto, cobalto-bronze, ferro-cobalto e ferro-bronze são ligantes empregados no corte de materiais de dureza mais moderada, como os mármore.⁽⁹⁾

De acordo com Shibuta,⁽¹³⁾ o cobalto funciona como um ligante nas ferramentas diamantadas. O silício (Si), quando presente na composição do ligante em pequenas

quantidades (< 2% em peso), aumenta a adesão deste com os cristais de diamante, evitando a perda prematura de diamantes por destacamento (pull out). O carbeta de tungstênio (WC) – 0,5-2% em peso e tamanho médio de partícula de 5 μm – aumenta a resistência ao desgaste da matriz ligante, controlando a taxa de perda de ligante por abrasão.⁽¹⁴⁾

Atualmente, a maioria das ferramentas diamantadas utilizam o cobalto (Co) como matriz ligante. O cobalto combina perfeita compatibilidade química com o diamante nas temperaturas de processamento, adequada retenção do diamante e boa resistência ao desgaste após algumas operações de corte. Entretanto, o cobalto está sujeito a grandes variações de preço no mercado, é um material estratégico, não sendo a melhor escolha em algumas aplicações.⁽¹⁾ Além disso, o cobalto é pouco disponível no mercado nacional (o que aumenta o seu valor comercial) e é tóxico quando do seu beneficiamento, e neste sentido, recentemente, pesquisadores têm procurado desenvolver ou propor novas ligas que possam ser alternativamente usadas para minimizar ou eliminar o conteúdo de cobalto nas ferramentas diamantadas, como por exemplo a liga Fe-Cu-Co.^(1,15-17) O presente trabalho, dedica-se ao estudo do sistema Fe-Cu como matriz metálica ligante para uso em pérolas de fios diamantados, visando produzir compósitos de propriedades compatíveis às dos comerciais importados utilizando pós do mercado nacional, ou seja, eliminando o uso do cobalto, o que diminui os custos de processamento e, conseqüentemente torna possível o desenvolvimento desta tecnologia no Brasil.

2 METODOLOGIA

Os compósitos do presente trabalho (pérolas diamantadas – produto tecnológico), foram produzidos via Metalurgia do Pó convencional e a Figura 1 mostra resumidamente a rota de processamento. Foram usados pós de ferro (Fe - 67 μm) e cobre (Cu - 20 μm) comerciais derivados de atomização como matriz ligante, ambos da METALPÓ. Foi empregado o SiC (da South Bay Techn) como controlador de desgaste da matriz.

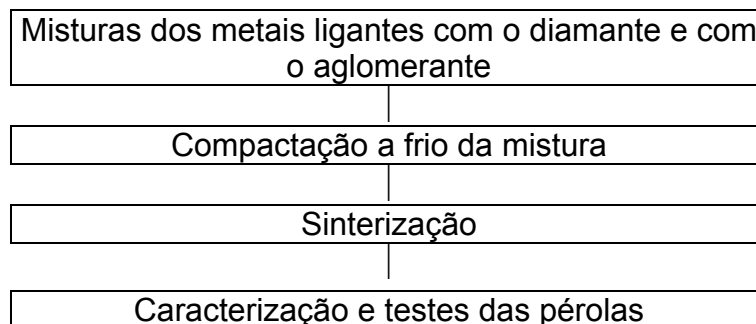


Figura 1. Rota de processamento das pérolas diamantadas via metalurgia do pó convencional.

Os pós foram pesados e misturados manualmente de acordo com as composições Fe-(5-10-15-20)%pCu, via dissolução em clorofórmio (aproximadamente 24 horas para a volatilização completa), usando cânfora como aglomerante/lubrificante orgânico (2% em peso). O carbeta de silício (SiC) foi adicionado à liga (1% em peso) para estudo de sua influência no controle do desgaste da matriz ligante. Conforme

descrito acima, os pós foram misturados primeiramente sem a presença dos diamantes, a fim de pré-avaliar a mistura ligante ideal para o compósito diamantado. Feito isso, seguindo os mesmos parâmetros, adicionou-se diamantes à mistura Fe-Cu-SiC nos diferentes teores de cobre, com o objetivo de produzir o compósito diamantado. Os diamantes utilizados são do tipo MBS960SI2 (General Electric Company, USA) – alta tenacidade e resistência ao impacto – com cobertura de carbetto de silício e níquel (SiC/Ni) para aumentar a aderência na matriz, produzidas especialmente para o uso em matriz ferrosa. Esses diamantes foram utilizados na granulometria 40/50 mesh (300-425 μm), na concentração 50, que se refere a 13% em volume de diamante por cm^3 ou 0,44 gramas de diamante/ cm^3 , que é a concentração usual de diamantes nas pérolas comerciais.

Afim de pré-avaliar a melhor proporção Fe:Cu, primeiramente foi feita a compactação dos metais ligantes e do compósito diamantado em matriz uniaxial de aço microligado de diâmetro 8 mm – altura da matriz \cong diâmetro para melhor distribuição de densidade – obtendo assim pastilhas cilíndricas. Após definir a estequiometria ideal Fe-Cu, procedeu-se com a compactação a frio das pérolas diamantadas (produto tecnológico), em matriz uniaxial de aço microligado, de diâmetro externo (ϕ_{EXT}) 11mm e diâmetro interno (ϕ_{INT}) 7 mm. A pressão de compactação utilizada foi de 350 MPa.⁽¹⁸⁾ Após a compactação, os corpos verdes foram submetidos à uma rápida etapa de secagem sob temperatura de 200°C e vácuo de 10^{-2} mmHg, para um tempo de 30 minutos, com o objetivo de remover a cânfora, o aglomerante/lubrificante orgânico usado na mistura.

As sinterizações foram realizadas em forno resistivo tubular – bp Engenharia – sob vácuo de 10^{-2} mmHg, nas temperaturas de 1050 e 1150°C, para um tempo de 25 minutos. Primeiramente foi conduzida a sinterização das misturas dos metais ligantes sem os diamantes, para avaliar a influência da adição do carbetto de silício (SiC) e averiguação microestrutural dos metais constituintes. Isto foi observado via MEV – Zeiss DSM 962. Após a sinterização, os corpos foram pesados – balança digital Scaltec de precisão 0,0001g – e suas dimensões medidas, para que junto com as medidas feitas na etapa de secagem, pudesse ser investigado os dados de retração/inchaço dos sinterizados.

Também foram feitos ensaios de dureza Brinell em durômetro PANTEC RBS, sob carga de 62,5 gf em cada amostra, para que, junto com os resultados de resistência ao desgaste por abrasão, pudesse ser definida a melhor mistura ligante para o compósito diamantado e a temperatura ideal de sinterização.

Todos os compósitos produzidos neste trabalho, foram submetidos a ensaios de desgaste por abrasão, tomando como resultado a média de 3 amostras. Estes ensaios foram conduzidos em um simulador físico Abrasímetro AMSLER Modificado – Contenco, Modelo AB 800 – que possui interface com um computador e, utiliza o software Pavitest Abrasímetro 2.31 para obtenção de dados complementares. As amostras foram acopladas verticalmente sob um disco de granito com diâmetro externo (ϕ_{EXT}) 80 cm e diâmetro interno (ϕ_{INT}) 40 cm, instalado horizontalmente na mesa do simulador, usando um suporte fixador. Para tal, foi utilizada rotação de 20 RPM do disco de granito, carga vertical (peso solto) sobre as amostras de 2 kgf, para um tempo de 2 minutos, com as amostras fixas em uma linha de corte. As amostras foram

pesadas antes e após cada ensaio em balança digital de precisão 0,0001g, para medir a resistência ao desgaste percentual (abrasão), que é dado por:

$$\Delta M = \frac{m_I - m_F}{m_I} \times 100 \quad (\text{eq. 01})$$

Onde: m_i é a massa inicial (antes do ensaio), e m_f a massa final (após o ensaio).

A distribuição dos cristais de diamante após abrasão foi observada via MEV.

Por último, foi medida a resistência ao desgaste por abrasão das pérolas diamantadas do presente trabalho em confronto com a das pérolas comerciais importadas, normalmente utilizadas para desmonte de rochas ornamentais, empregando os mesmos parâmetros já descritos acima. Para efeito comparativo, foi também processada uma pérola com os mesmos parâmetros, e para tal utilizou-se dos diamantes sem a presença de qualquer cobertura protetora em sua superfície, com o objetivo de avaliar a influência da cobertura de SiC/Ni na aderência matriz ligante/diamante e conseqüentemente na resistência à abrasão. A Figura 2 fornece uma ampla visão das pérolas (produto tecnológico) produzidas por este trabalho.

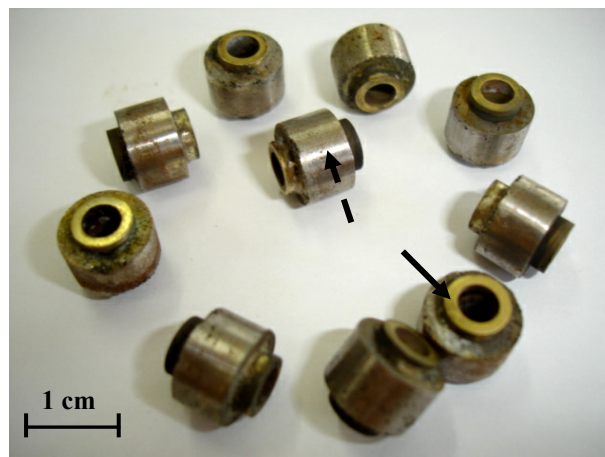


Figura 2. Pérolas diamantadas Fe-20%pCu-1%pSiC-Diamante, produzidas por este estudo.

Os tubos (latão) na face interna da pérola, foram brasados através de solda com prata, como indicado pela seta contínua. A seta tracejada, mostra o compósito diamantado, e pode ser observado que aí não é verificado vestígios de prata, por causa da boa fluidez da mesma. Cabe ressaltar que este é o método industrial de brasagem de pérolas diamantadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3, mostra os valores médios de retração/inchaço após sinterização a 1050 e 1150°C para o sistema Fe-Cu-SiC. Pode ser observado que na sinterização a 1050°C ocorre retração, pois nesta temperatura ocorre apenas sinterização no estado sólido, já que o cobre funde a 1084°C. Analisando a sinterização a 1150°C, nota-se o

inchaço em quase todas as composições. Nesta temperatura, há a presença de uma fase líquida formada pelo cobre nos primeiros minutos de sinterização. A partir daí, o cobre líquido penetra de maneira progressiva nos contornos de partículas do ferro (metal base) formando um filme, otimizando os contatos e facilitando a difusão. Como consequência dessa molhabilidade do cobre líquido, ocorre inchaço do sinterizado, pois onde originalmente havia cobre sólido se torna região de porosidade. O inchaço durante sinterização por fase líquida é um comportamento clássico para o sistema Fe-Cu, onde o aditivo é extremamente mais solúvel no metal base do que o recíproco. Isso pode ser perfeitamente observado na ref. (19), que mostra o diagrama de fases do sistema, onde a 1150°C tem-se solubilidade de cobre (aditivo) em ferro (metal base) de 9%, da ordem de duas vezes superior à solubilidade de ferro em cobre, o que resulta em inchaço do sinterizado. Para o sistema Fe-Cu-SiC, observa-se que para teores inferiores a 10% em peso de cobre ainda ocorre pequena retração, pois aí a quantidade de fase líquida formada ainda é razoavelmente pequena para gerar a porosidade característica do inchaço, prevalecendo, nestas condições, a sinterização no estado sólido. Já para teores de cobre superiores a 10% em peso, observa-se o fenômeno de inchaço, já explicado anteriormente e, da ordem de 2,5 vezes superior ao do sistema Fe-Cu, o que pode ser atribuído à influência das partículas dispersas de SiC. A densidade de 3,22 g/cm³ do carбето de silício (SiC) é cerca de três vezes menor que a do ferro e do cobre, então quando o cobre funde e forma a fase líquida, as partículas de SiC emergem no cobre líquido, acompanhando o fluxo e precipitando nos contornos de grão do ferro. Isso produz um aumento da área de superfície nos contornos interpartículas, e consequentemente sugere maior molhabilidade do cobre líquido, o que pode gerar um volume mais acentuado de porosidade, ocasionando um maior nível de inchaço.

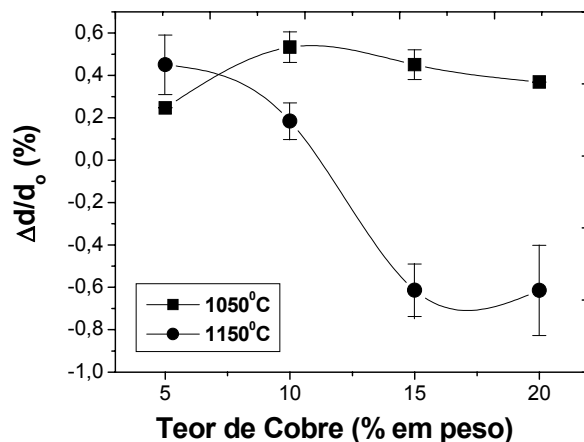


Figura 3. Retração e inchaço para o sistema Fe-Cu-SiC, após sinterização a 1050 e 1150°C, para um tempo de 25 minutos.

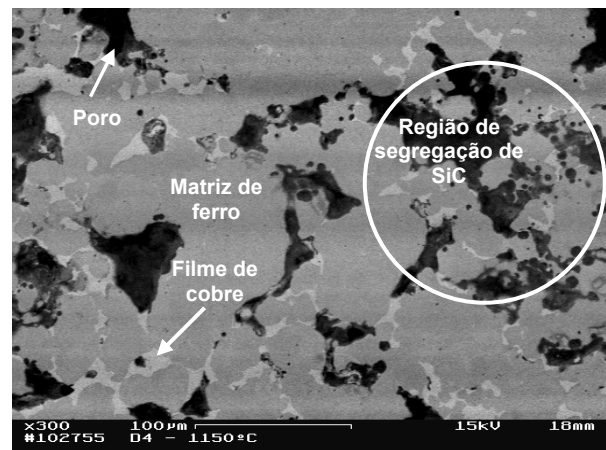


Figura 4. Micrografia do sistema Fe-20%pCu-1%pSiC, sinterizado a 1150°C/25 minutos.

A microestrutura do sistema Fe-20%pCu-1%pSiC após sinterização a 1150°C, é representada pela Figura 4, onde se observa a influência da molhabilidade causada pela fase líquida do cobre nos contornos de grão do ferro, o que proporciona um aumento das regiões de contato, facilita a difusão e gera a porosidade característica do

inchaço nas regiões onde originalmente havia cobre sólido. Observa-se um elevado grau de porosidade para o sistema Fe-20%pCu-1%pSiC, com poros irregulares e de grandes dimensões (30 μm), justificando o nível de inchaço atingido. Estes dados estão em perfeita concordância com a ref.(19) e com os resultados da Figura 3. É interessante ressaltar que com a formação de fase líquida, as partículas de SiC aparecem, contornando as partículas de Fe, acompanhando, em parte, o fluxo do Cu líquido. Obviamente isto destrói a homogeneização da distribuição de SiC nas amostras mediante mistura anterior, causando a segregação observada no círculo da Figura 4.

A Figura 5 fornece resultados de dureza Brinell em função do teor de cobre para o sistema Fe-Cu-1%pSiC. Podem ser vistos, maiores valores de dureza para as amostras com maior percentual de cobre sinterizadas a 1150°C. O aumento dessa propriedade mecânica é atribuído à presença do carbeto de silício (SiC), que fornece em média 14% de aumento em dureza à matriz (uma vez que a dureza média do sistema Fe-Cu é de 32 HB), uma propriedade de extrema importância para o composto ligante, quando do seu uso em ferramentas de corte. Partículas cerâmicas finamente dispersas na matriz metálica atuam como controladoras da taxa de desgaste por abrasão da matriz, e por conseguinte da ferramenta.⁽⁷⁾

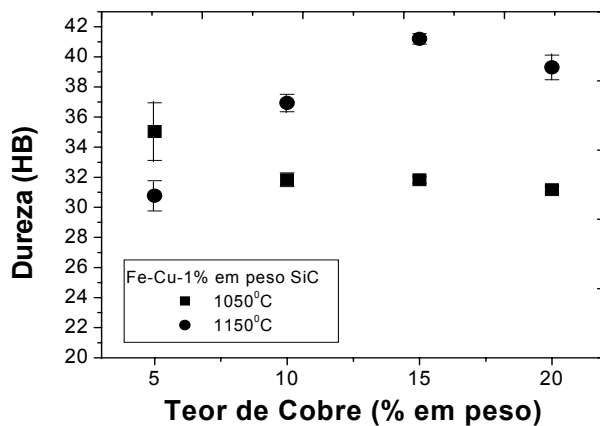


Figura 5. Valores de dureza (HB) para o sistema Fe-Cu com adição de 1% em peso de carbeto de silício (SiC).

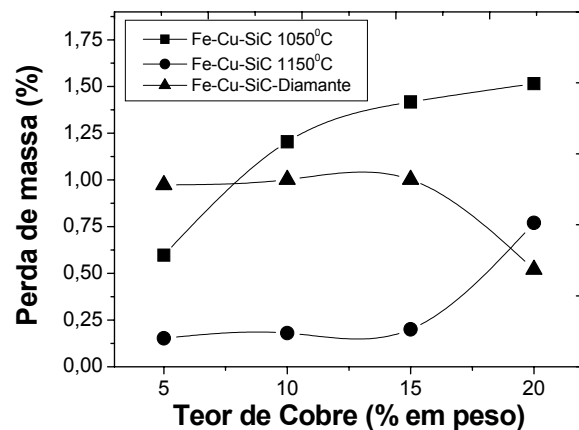


Figura 6. Perda de massa após abrasão do sistema Fe-Cu-SiC nas duas temperaturas de sinterização e composto diamantado sinterizado a 1150°C/25 minutos.

Os ensaios de desgaste por abrasão foram feitos primeiramente com o ligante metálico, a fim de avaliar a resistência ao desgaste, e junto com os testes de dureza definir a melhor proporção Fe:Cu para o composto diamantado.

A Figura 6, mostra a perda de massa (resistência a abrasão) das amostras em função do teor de cobre, para o sistema Fe-Cu-1%pSiC, sinterizado a 1050 e 1150°C. Analisando o sistema Fe-Cu-1%pSiC, observa-se que há uma diferença significativa nos valores obtidos, quando considera-se as duas temperaturas de sinterização e, há uma perda de massa um pouco mais acentuada no teor de 20% em peso de cobre, o que pode ser atribuído ao fato de ter ocorrido maiores inchaços para as amostras com maiores teores de cobre – levando a maiores quantias de porosidade – o que reduz a resistência ao desgaste por abrasão da ferramenta.

Pode-se concluir que o emprego da temperatura de 1150°C promove sinterização mais efetiva, pois promoveu menores índices de perda de massa e maiores valores de dureza. Teores de cobre mais elevados, promovem maior dureza nos sistemas estudados e, o uso do carbeto de silício (SiC) aumenta a dureza e a resistência ao desgaste por abrasão (em relação o valor médio do sistema Fe-Cu). Porém, para ainda definir a mistura ligante ideal para a ferramenta, é necessário estudar a resistência à abrasão dos sistemas sinterizados com adição de diamantes. A Figura 6, também mostra os resultados obtidos de resistência a abrasão em função do teor de cobre para o compósito diamantado (Fe-Cu-SiC-Diamante), sinterizado a 1150°C. Pode-se perceber que há uma perda de massa relativamente pequena (< 1%) para todas as misturas ligante em seus diferentes teores de cobre. Pode ser também identificado um valor bem menor de perda de massa, da ordem da metade, para a mistura com teor de 20% em peso de cobre, o que sugere aí uma resistência à abrasão superior, justificando a escolha da mesma como a ideal para o compósito diamantado.

O mecanismo de desgaste por abrasão do compósito diamantado pode ser melhor entendido através da Figura 7. Observa-se, que devido à abrasão sofrida pela matriz ligante, as faces cortantes dos primeiros diamantes ficam expostas na superfície da amostra. Em seguida, os diamantes de maior exposição (altura de protusão), os quais já foram submetidos a um maior trabalho de corte, começam a clivar ou trincar. Com o decorrer do corte, os cristais mais danificados são liberados ou destacados (“pull-out”) e, ao mesmo tempo novos cristais que estavam no “bulk” da ferramenta surgem, continuando o processo, pois o desgaste da matriz metálica é contínuo, até o fim da vida da ferramenta.

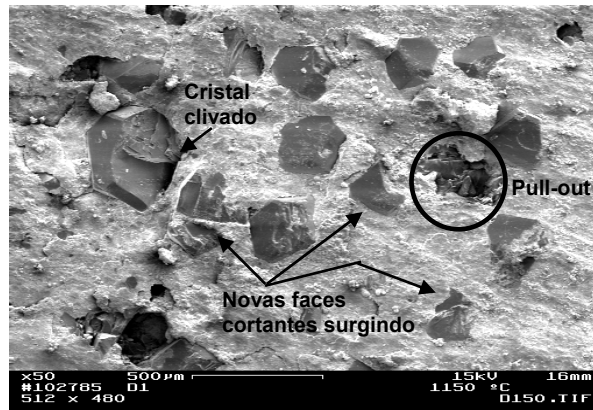


Figura 7. Distribuição dos cristais de diamante na matriz ligante de Fe-20%pCu-1%pSiC após ensaio de resistência à abrasão.

Após definir a melhor mistura ligante e a temperatura ideal de sinterização, foi processado o compósito Fe-20%pCu-1%pSiC-Diamante para as pérolas diamantadas (produto tecnológico), com o objetivo de comparar a resistência ao desgaste por abrasão das pérolas produzidas neste trabalho, em confronto com as pérolas comerciais que são usualmente empregadas nas pedreiras para desmonte. Para tal foram utilizadas dois tipos de pérolas comerciais e 2 tipos de pérolas aqui produzidas (uma com SiC de 8µm e outra com SiC 23µm). A Tabela 1, mostra a perda de massa após ensaio de desgaste por abrasão das pérolas produzidas neste trabalho e das pérolas comerciais importadas, bem como de uma pérola processada utilizando

diamantes sem cobertura para efeito comparativo. Pode-se notar que a pérola comercial B apresenta uma resistência a abrasão da ordem de 2 vezes superior à perla comercial A. Isso pode ser atribuído à composição do ligante, onde esta possui cobalto (60%p) como elemento majoritário da liga, silício (28%p) e tungstênio (12%p) respectivamente, onde este último é normalmente utilizado para corte de materiais de dureza extremamente elevada, como o concreto por exemplo, enquanto a pérola comercial A, que também é muito empregada, principalmente para desmonte ou processamento de granitos possui cobre (32%p), silício (26%p), ferro (22%p) e zinco (20%p) respectivamente. Considerando as observações acima e confrontando as pérolas, pode ser observado que se consegue com as pérolas do presente trabalho, uma resistência à abrasão de mesma ordem à de alguns tipos de pérolas comerciais importadas normalmente empregadas nas lavras de rochas ornamentais (tipo A), uma vez que se utilizou de materiais 100% nacionais, com valor de mercado bem reduzido e/ou estável, como Fe e Cu, para produzir esse compósito para as pérolas diamantadas deste trabalho, quando comparada com as ferramentas que usam cobalto.

Analisando agora a pérola C e, comparando novamente os resultados com as pérolas do presente trabalho, é fácil perceber que as pérolas aqui produzidas (diamante com cobertura), apresentam resistência à abrasão de aproximadamente 20 vezes superior. Este resultado está atribuído à altíssima qualidade dos diamantes utilizados nas pérolas deste trabalho, os quais, possuem cobertura de SiC e Ni, preparada especialmente quando do uso de matriz ferrítica, como neste caso. A cobertura na superfície plana e lisa do diamante o protege da possível reação com o ferro (grafitização), já que este é muito ávido ao carbono, proporcionando assim, um ganho em aderência matriz/ligante/diamante e resistência ao desgaste por abrasão.

Tabela 1. Perda de massa das pérolas produzidas neste trabalho, em confronto com as das pérolas comerciais importadas após ensaio de resistência ao desgaste por abrasão/2 minutos.

PÉROLA	Massa antes do ensaio (mi)	Massa após o ensaio (mf)	Perda de massa (mi – mf)
Comercial A: Fe-Cu-Zn-Si-Diamante	7,3840 g	7,3726 g	0,0114 g
Comercial B: W-Co-Si-Diamante	4,7834 g	4,7783 g	0,0051 g
Nossa: Fe-Cu-SiC-Diamante (*)	1,9457 g	1,9211 g	0,0246 g
Nossa: Fe-Cu-SiC-Diamante (**)	1,9210 g	1,9082 g	0,0128 g
Pérola C: Fe-Cu-SiC-Diamante (diamante sem cobertura)	1,822 g	1,587 g	0,235 g

OBS: (*) SiC (8 μm); (**) SiC (23 μm). As massa iniciais das pérolas produzidas são inferiores às das comerciais porque as comerciais apresentam um tubo interno de cobre, colocado por brasagem, e o cabo de aço inox 316 trançado, passante entre o orifício das pérolas.

É importante ressaltar, que no processamento das pérolas diamantadas foi utilizado carbetto de silício (SiC) nas granulometrias de 8 e 23 μm na mistura ligante, sendo que este último ficou mais homogêneo na mistura e proporcionou um maior controle da taxa de desgaste da matriz do compósito diamantado, gerando assim os melhores resultados.

4 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que conseguiu-se processar pérolas de mesmo potencial abrasivo e de corte das pérolas importadas comerciais, utilizando pós metálicos do mercado nacional, que unem excelentes propriedades a um valor de mercado muito satisfatório, o que possibilita uma significativa redução dos custo de processamento. Isso indica a viabilidade do desenvolvimento desta tecnologia tão importante principalmente para o setor de rochas ornamentais aqui no Brasil, onde a demanda deste tipo de ferramenta é bastante elevada, já que este tem um fortíssimo potencial geológico e atualmente figura entre os cinco maiores produtores de rochas ornamentais do mundo. De acordo com os resultados experimentais deste trabalho, são agora apresentadas as seguintes conclusões:

- A mistura Fe-20%pCu-1%pSiC-Diamante é a estequiometria ótima (dentre as composições estudadas) do compósito diamantado para as pérolas diamantadas, pois com este teor de cobre (20% em peso) atingiu-se níveis de dureza satisfatórios como matriz ligante (sem diamantes), onde também foi verificado a maior resistência à abrasão para o compósito diamantado.
- A granulometria do carбето de silício 23 μ m, usado de forma experimental quando da produção das pérolas diamantadas, proporcionou uma resistência a abrasão de aproximadamente 2 vezes superior em relação ao SiC 8 μ m e 20 vezes em relação à pérola com diamante sem cobertura, pois os melhores resultados conseguidos com as pérolas aqui produzidas foram alcançados com esta granulometria, ficando este mais homogêneo na mistura, o que proporcionou um maior controle do desgaste da matriz.
- Os testes de desgaste mostram que, conseguiu-se com este estudo exploratório, através de metalurgia do pó convencional, produzir pérolas diamantadas de boa qualidade, atingindo uma resistência à abrasão da mesma ordem da de algumas pérolas comerciais importadas que são normalmente empregadas nas lavras de rochas ornamentais. Cabe ressaltar que o ligante usado Fe e Cu, são materiais amplamente disponíveis no mercado nacional a um valor de mercado satisfatório, o que mostra, que se pode produzir uma ferramenta de corte utilizando pós nacionais que atende as exigências do mercado com uma significativa redução dos custos de matéria-prima, quando em comparação com o cobalto, que é da ordem de 20 vezes mais caro. Isso mostra que é possível nacionalizar esta tecnologia, ou seja, torna-la viável a qualquer operação de corte, no setor de rochas ornamentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq por financiar este trabalho, via projeto (nº 475465/03-2) e, o 1º autor agradece a CAPES pela bolsa de estudo concedida.

REFERÊNCIAS

- 1 Del Villar, M. Consolidation of diamond tools using Cu-Co-Fe based alloys as metallic binders. *Powder Metallurgy*. v.44, n.1, p. 82-90, 2001.
- 2 Filgueira, M., Pinatti, D. G. "In Situ" Diamond Wires – Part I: The Cu-15 vol.% Nb high strength cable. *Journal of Materials Processing Technology*. v.128, p. 191-195, 2002.
- 3 Daniel, P. Slate without Waste. *Quarrying*. IDR. n.4, p. 200-203.
- 4 Biasco, G. Diamond Wire for Quarrying Hard Rocks. *Stone*. IDR. n.5, p. 252-255, 1993.
- 5 Asperti, G., Schotte, D. Sawing Reinforced Concrete with Diamond Wire. *Diamonds in Industry*. De Beers, p. 19-21, 1995.
- 6 Pinzari, M. Quarrying Stone by Diamond Wire in Italy. *IDR*. n.5, p. 231-236, 1989.
- 7 Filgueira, M. Produção de Fios Diamantados "In Situ". Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF/LAMAV. p.157, 2000.
- 8 Filgueira, M., Pinatti, D. G. Processing of Diamond Composites by Powder Metallurgy and Rotary Forging. *Journal of Materials Science Forum*. v. 416-418, p. 228-234, 2003.
- 9 Przyklenk, K. Diamond Impregnated Tools – Uses and Production. *Toolmaking*. IDR. n.4, p. 192-195, 1993.
- 10 Filgueira, M., Pinatti, D. G. "In Situ" Diamond Wires – Part II: The Bronze 4%weight Diamond Cutting Rope. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 132, p. 132-137, 2003.
- 11 Urakawa, N. et al. Cutting Performance of Bonded Abrasive Type Diamond Wire Saw. In: *Proc. Intertech 2000*. Vancouver/Canada. July, 2000.
- 12 Filgueira, M., Pinatti, D.G. Production of diamond wire by Cu-15%vol.Nb in situ Process. In: *Proc. Of the 15th Int. Plausee Seminar*. Reutte, Austria. Plansee Holding, AG. v.1, p. 360-374, 2001.
- 13 Shibuta, D. Recovery of Diamond from Diamond Tool Scrap. Mitsubishi Metal Corporation. Japanese Patent. 1983.
- 14 Mészáros, M., Vadasdi, K. Process and Equipment for Electrochemical Etching of Diamond – Containing Co-WC Tools and Recovery of Diamond from Used Steel Tools. *Journal Refractory Metals & Hard Materials*. v. 14, p. 229-234, 1994.
- 15 Clark, I.E. Cobalite HDR – a new prealloyed matrix powder for diamond construction tools. *Industrial Diamond Review*. n.3, p 177-182, 2002.
- 16 Rosa, G.L. Evaluation of Diamond tool Behaviour for Cutting Stone Materials. *Industrial Diamond Review*. n.1, p. 45-50, 2004.
- 17 Weber, G., Weiss, C. Diamix – A Family of Bonds Based on Diabase – V21. *Industrial Diamond Review*. n.2, p. 28-32, 2005.
- 18 Silva, V.F., Sampaio M.V.C.; Carvalho, E.A.; Bobrovnitchii, G.S.; Filgueira, M. On the Compacting of Powders of the systems Fe-Cu and Fe-Cu-Diamond. *Materials Science Forum*. v. 498-499, p. 16-22, 2005.
- 19 ASM HANDBOOK. Alloy Phase Diagrams. v.3, 3.ed, p. 168, 1979.