

Desenvolvimento de Uma Nova Rota de Processamento de Ferramentas Diamantadas: Metalurgia do Pó e Forjamento Rotativo

Marcello Filgueira¹, Daltro Garcia Pinatti²

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF/ Centro de Ciências e Tecnologia – CCT
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PPGECEM
Grupo de Pesquisa: Compósitos e Ferramentas de Materiais de Alta Dureza – Gfer
Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes/RJ, CEP: 28013-600.

e-mail: marcello@uenf.br

²Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAR/FAENQUIL
Pólo Urbo Industrial, Gleba AI6, Lorena/SP, CEP: 12600-000.

e-mail: pinatti@demar.fauenquil.br

RESUMO

Este trabalho mostra a rota de processamento de um compósito diamantado à base de bronze 4% em peso diamante, para aplicação direta como fios diamantados, e serras lineares de desmonte e corte de rochas ornamentais. Esta rota consiste do emprego das técnicas de compactação da mistura pulverulenta, sinterização e forjamento rotativo. Ensaio de tração revelaram uma resistência de 230MPa para o compósito diamantado de 1,84mm de diâmetro. Microscopia eletrônica de varredura mostrou a distribuição dos cristais de diamantes ao longo do compósito durante a sua manufatura, assim como a adesão dos diamantes para com a matriz de bronze. Testes de corte feitos com fios do compósito bronze 4% em peso diamante, revelaram um desempenho da ordem de 4 vezes superior ao dos discos diamantados de corte, contudo, seu desempenho é cerca de 5 a 8 vezes inferior ao dos fios diamantados perolados, devido à baixa resistência à abrasão da matriz de bronze, baixa adesão entre o par bronze-diamante, devido ao uso de diamantes não metalizados.

Palavras chaves: Tecnologia “In Situ”, forjamento rotativo, sinterização, compósito diamantado.

Development of a New Route to Process Diamond Cutting Tools: Powder Metallurgy and Swage

ABSTRACT

This paper shows the manufacture route of the bronze 4% weight diamond composite rope for direct application as diamond wires, and linear saws in the slabbing and cutting of dimension stones. This route consists of powder mix compactation, sintering and rotary forging techniques. Tensile tests were performed, reaching an ultimate tensile strength of 230MPa for the diameter of $\varnothing=1.84\text{mm}$. Scanning electron microscopy showed the diamond crystals distribution along the composite rope during its manufacture, as well as the diamond adhesion to the bronze matrix. Cutting tests were carried out with the external cutting rope, showing a probable performance 4 times higher than the diamond sawing discs, however its probable performance was about 5 to 8 times less than the conventional diamond wires (pearl system) due to the low abrasion resistance of the bronze matrix, low adhesion between the pair bronze-diamond due to the use of not metallized diamond single crystals.

Keywords: “In Situ” Technology, swaging, sintering, diamond composite.

1 INTRODUÇÃO

Serras lineares e circulares, corôas de polimento, fios de pérolas diamantadas dentre outros, são ferramentas de corte diamantadas usadas no desmonte, corte, e polimento de rochas ornamentais, materiais cerâmicos e metais não-ferrosos em geral [1]. Há uma grande variedade de tipos de materiais usados na manufatura destas ferramentas, mas o mais empregado é o sistema matriz metálica ligante – cristais de diamantes [2]. Os diamantes são impregnados na matriz metálica através de duas maneiras: eletrodeposição

ou sinterização. Nas ferramentas eletrodepositadas, há apenas uma monocamada de diamantes na superfície da ferramenta enquanto que nas ferramentas sinterizadas os diamantes são distribuídos em todo o volume e superfície da ferramenta, além de ser mais barato e mais simples de se processar. Desta forma, as ferramentas diamantadas sinterizadas são as mais comuns e as mais procuradas em todo o mundo [2, 3].

A seleção da matriz metálica é baseada na abrasividade do material a ser cortado ou polido. Para materiais altamente abrasivos tal qual o concreto, SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, matriz de tungstênio é usada. A matriz de cobalto é empregada no corte de materiais cujas abrasividades são similares aos granitos. Matrizes de bronze e cobalto e suas ligas, são empregadas no corte de mármore. Latão, bronze ou cobre são empregados no corte de cerâmicas, vidros, e metais não-ferrosos [2].

A sinterização é normalmente realizada por prensagem a quente. Neste caso, a mistura pulverulenta ou o corpo verde (com o formato desejado) é submetido à sinterização ao mesmo tempo em que é prensado dentro de um molde. Um exemplo clássico é mostrado por Contardi [4], o qual explana um método de se processar pérolas diamantadas para os fios de corte, onde a mistura matriz ligante metálica + cristais de diamante é confinada dentro de orifícios de um molde de grafite. Este molde é colocado dentro da câmara de um forno resistivo a vácuo, acoplado a uma prensa. Os punções da prensa conduzem a corrente para a sinterização dos corpos verdes, concomitantemente à prensagem. A produtividade é elevada, da ordem de 120 pérolas por hora.

Neste trabalho é apresentada uma rota de processamento de compósitos diamantados alternativa, denominada Tecnologia "In Situ", a qual envolve sinterização convencional e forjamento rotativo (*swaging*) da mistura matriz metálica - diamantes, em substituição à rota convencional de prensagem a quente. Foram produzidos fios à base do compósito bronze 4% em peso diamantes, para uso como fios diamantados e serras lineares em geral.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Tabela 1 fornece os valores típicos de concentração versus densidade de diamantes em ferramentas de corte. Neste trabalho foi empregada a concentração 50 de diamantes (igual a 2,2 quilates/cm³ = 0,44g/cm³ = 0,13cm³ de diamantes/cm³ de ferramenta) já que esta é a concentração largamente usada nas ferramentas de desmonte e corte de rochas ornamentais. Os diamantes utilizados foram do tipo De Beers SDA+65 40/50 mesh (425 - 300µm). O pó de bronze atomizado utilizado neste trabalho apresenta 80% das partículas na faixa de tamanho de 75/60µm, e a Tabela 2 mostra a sua análise química em concordância com a ref. [5]. A Figura 1 mostra o fluxograma do procesamento dos fios à base do compósito bronze/diamante.

Tabela 1: Concentrações típicas versus densidade de diamantes em ferramentas de corte.

Concentração de Diamantes	Massa de diamante/cm ³ de volume abrasivo		Volume de diamante(cm ³)/cm ³ da ferramenta
	Quilates	Gramas	
100 (*)	4,4	0,88	0,25 (25%)
50	2,2	0,44	0,13 (13%)
42	1,85	0,37	0,11 (11%)
30	1,32	0,26	0,07 (7%)

(*) Concentração 100 refere-se a 25% em volume de diamante por cm³, e tem como base 4,4 quilates de diamantes/cm³. 1 quilate = 0,2 gramas. O n° entre parênteses da última coluna refere-se a porcentagem em volume de diamante na ferramenta, e é encontrado dividindo-se a massa de diamante da penúltima coluna, pela densidade do diamante (ρ_{DIAM.} = 3,48g/cm³).

Tabela 2: Composição química do pó de bronze (%).

	Sn	Fe	Al	Zn	Pb	C	S	O	N
bronze	10,8	0,008	----	----	----	0,03	----	0,04	0,01

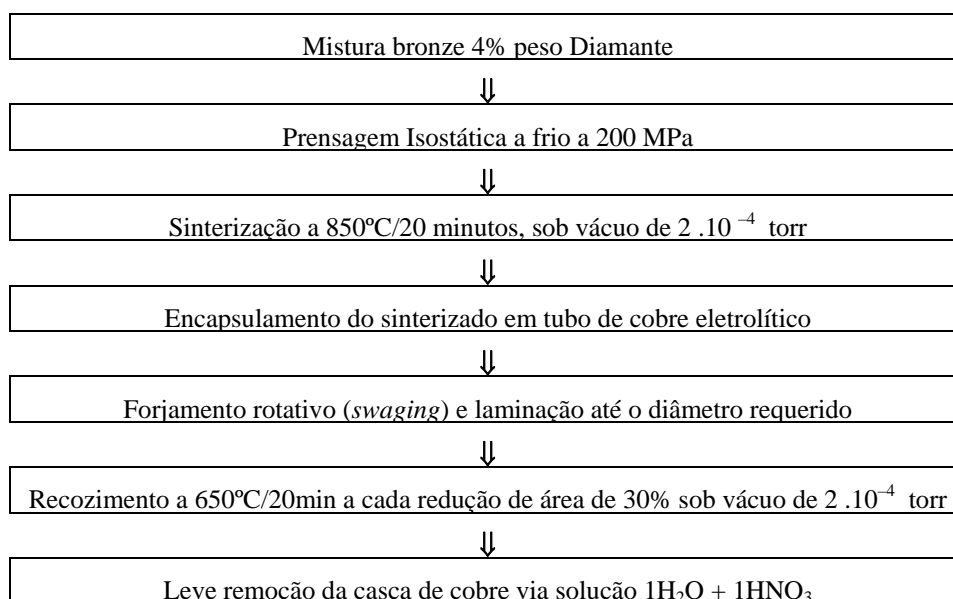


Figura 1: Fluxograma de processamento do fio à base do compósito bronze/diamante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microestrutura e Comportamento Mecânico

A Figura 2 mostra o aspecto microestrutural da secção longitudinal do sinterizado inicial (antes do forjamento rotativo) de bronze 4 % em peso diamantes, com diâmetro $\varnothing=8.00\text{mm}$. A distribuição dos cristais de diamantes é relativamente espaçada. A Figura 3 mostra a secção transversal do fio diamantado de diâmetro $\varnothing=1,84\text{mm}$ ($R=8^2/1,84^2=18,90X$). Como pode-se observar, o *swaging* promoveu uma elevada redução em área, e os cristais de diamantes permaneceram intactos, sem qualquer sinal de fratura ou clivagem devido aos impactos mecânicos sucessivos impostos durante o *swaging*. Este fato é de enorme importância, porque a capacidade de corte da ferramenta é fortemente dependente da integridade dos diamantes.

Para o compósito bronze 4% em peso diamante, a carga de ruptura é mostrada em função do diâmetro do fio, ao longo dos vários estágios de seu processamento (Figura 4). A curva da Figura 4 não extrapola a zero, mas para $\varnothing=1,20\text{mm}$, cujo diâmetro é o limite do contato entre cristais diamante-diamante. Para este diâmetro, a carga de ruptura é 180N, evidenciando alguma aderência entre bronze e diamantes da ordem de 160MPa ($\sigma \approx 180\text{N}/[\pi \cdot \varnothing^2/4] \approx 180\text{N}/[(\pi/4) \cdot (1,20)^2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2] \approx 160\text{MPa}$). Na Figura 5, a tensão máxima de ruptura permanece constante em 230MPa, até $\varnothing=1,84\text{mm}$, após o qual a tensão máxima decresce. Os dados da Figura 8 se referem aos valores de tensão máxima de ruptura para o mesmo compósito. Isto indica que $\varnothing=1,84\text{mm}$ é o diâmetro ótimo para esta composição estequiométrica e tamanho de grão de diamantes ($350\mu\text{m}$). Todos os dados são uma média dos resultados de 5 a 7 amostras. O módulo elástico médio encontrado foi de $E=11,5\text{GPa}$. Para o bronze comercial recozido, a tensão máxima de ruptura é de 260MPa e o módulo elástico, $E=16\text{GPa}$ [3]. A presença de diamantes nos fios de diâmetros superiores a $\varnothing=1,84\text{mm}$ apresentam menor influência na tensão máxima de ruptura, porém diminui E (material mais flexível), uma vez que o mesmo se distribui uniformemente no compósito. Todos os ensaios de tração foram realizados de acordo com a referência [6].

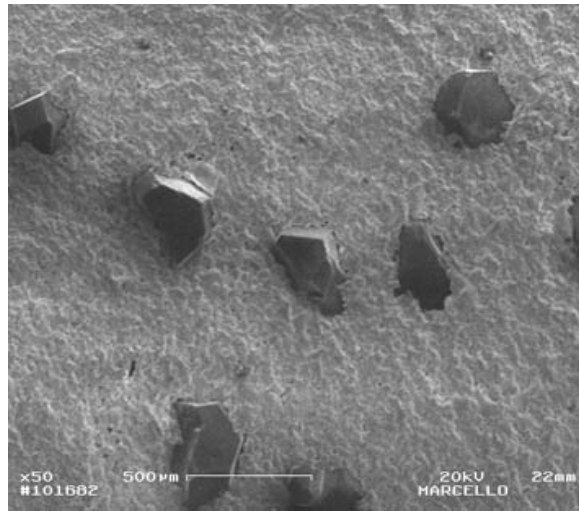


Figura 2: Secção longitudinal do sinterizado bronze 4% em peso diamante. $\varnothing=8,00\text{mm}$.

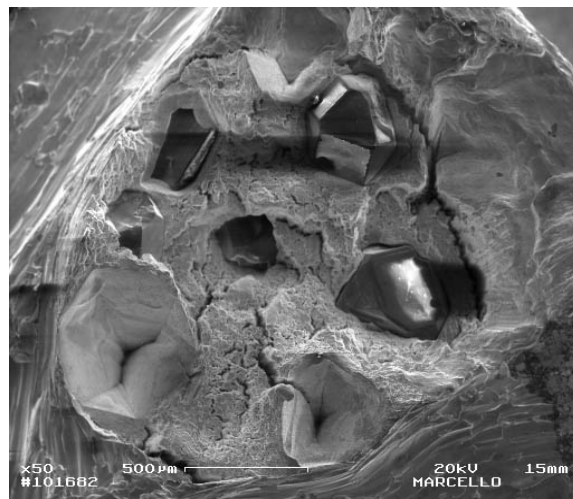


Figura 3: Secção transversal do composto diamantado. $\varnothing=1,84\text{mm}$.

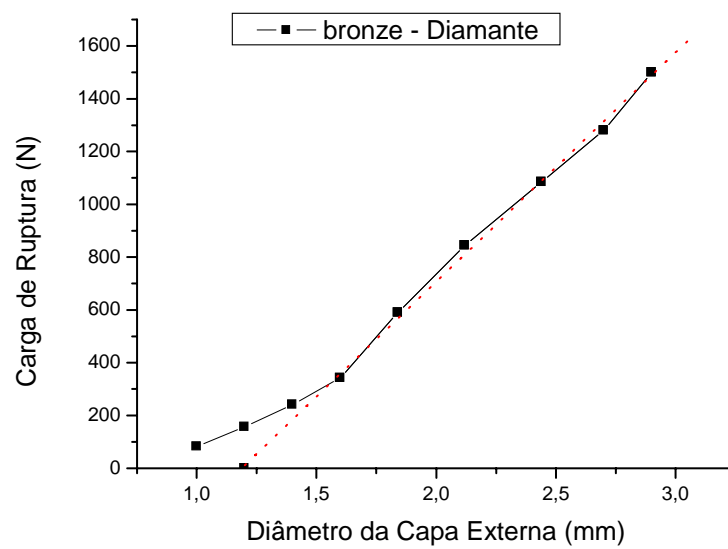


Figura 4: Carga de ruptura (N) versus diâmetro do fio do composto diamantado (mm).

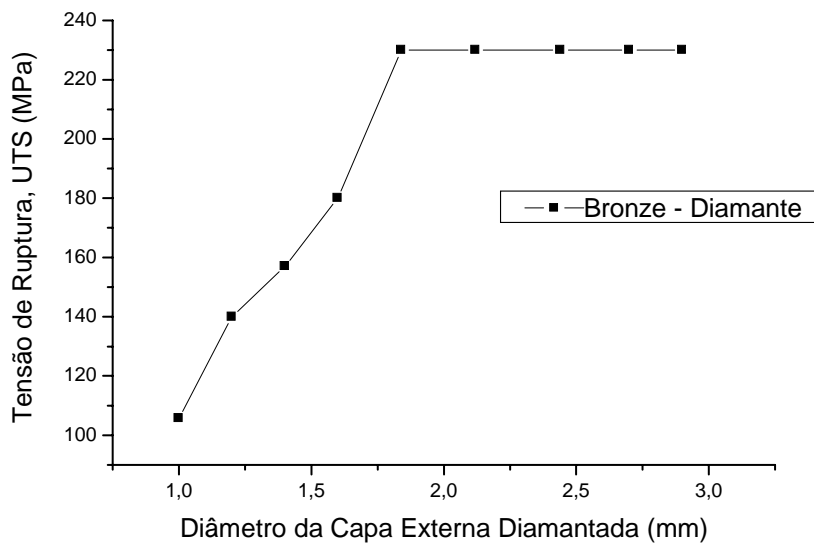


Figura 5: Tensão de ruptura (MPa) versus diâmetro do compósito diamantado (mm).

3.2 Aderência Bronze – Diamante

As Figuras 6 e 7 mostram a interface bronze-diamante nos vários estágios do processamento (como sinterizado- $\varnothing=8,00\text{mm}$, e $\varnothing=5,00\text{mm}$ respectivamente). A camada de Cu é removida com $1\text{H}_2\text{O} + 1\text{HNO}_3$ visando a exposição das faces cortantes dos cristais de diamantes. Como se pode observar destas figuras, não há espaço de separação ou falhas entre o par bronze e diamante. Não há interdifusão entre ambos, e a resistência adesiva (força de adesão por unidade de área) é menor que a tensão máxima de ruptura de 230MPa do compósito bronze 4% em peso diamante.

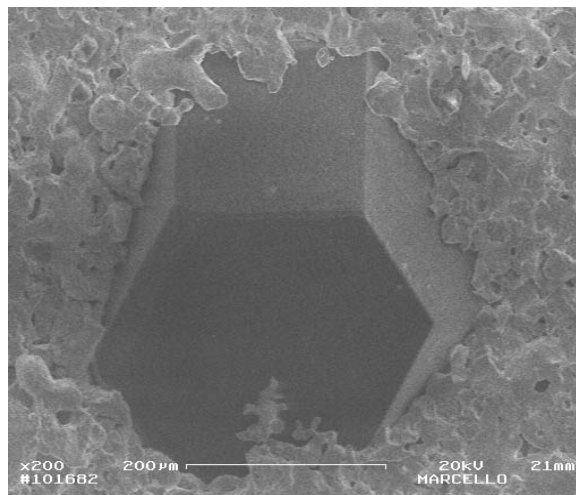


Figura 6: Vista de um cristal de diamante embetido na matriz de bronze.

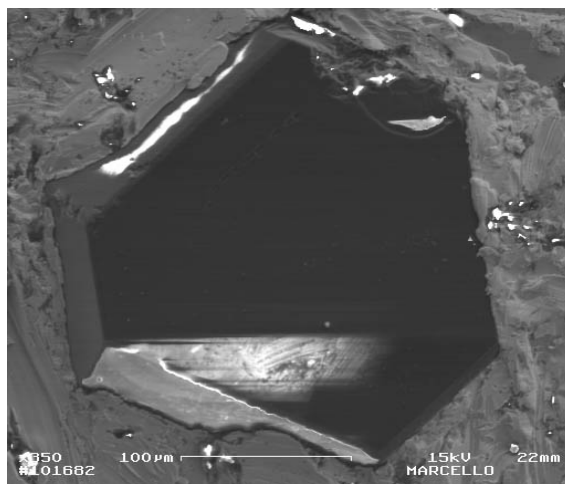


Figura 7: Interface bronze-diamante. Ø=5,00mm. Vista longitudinal.

3.3 Resultados Preliminares de Corte em Mármore

A Tabela 3 mostra os dados de corte em mármore com um fio à base do compósito bronze 4 % em peso diamante. As Figuras 8 a, b e c mostram micrografias do fio, antes, em situação intermediária, e no fim do corte (fim de vida útil do fio de corte), respectivamente. Os testes foram feitos com secções de 0,22m de comprimento do fio diamantado produzido neste trabalho, resultando em $1188 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / 0,22\text{m} = 0,54 \text{ m}^2/\text{m}$ de área de mármore cortado por metro de fio. Este resultado é de 5 a 8 vezes inferior do que o resultado encontrado para o corte com o sistema de fio diamantado convencional perolado. Uma razão para este baixo rendimento do fio de bronze 4 % em peso diamante é a baixa resistência à abrasão da matriz de bronze, conforme mostra a Figura 8, onde se observa uma rápida degradação do bronze.

Tabela 3: Dados de corte em mármore com o fio diamantado produzido.

N	ϕ , mm	σ , mm	$\pm \epsilon$, mm	A, cm ²
6	1,93	0,06	0,02	0
10	1,79	0,06	0,02	52,5
11	1,78	0,06	0,02	65
20	1,73	0,06	0,01	70,5
22	1,69	0,04	0,01	84
31	1,67	0,06	0,01	110
31	1,61	0,06	0,01	119
31	1,58	0,06	0,01	118,5
26	1,50	0,08	0,01	126
34	1,44	0,10	0,02	97,5
33	1,38	0,11	0,02	101,25
28	1,31	0,14	0,03	84
18	1,23	0,12	0,03	56,25
N – número de medidas de ϕ durante o corte		ϵ - erro = $\frac{\sigma}{(N)^{1/2}}$		
ϕ - diâmetro médio $\phi = (\sum \phi_i) / N$		σ - variância: $\sigma = (\sum [\phi_i - \phi]^2)^{1/2} / (N - 1)$		

Aliado a isto, pode-se também observar que os cristais de diamantes se soltam facilmente da matriz, o que diagnóstica um fraco trabalho de adesão. Outra comparação pode ser feita com os resultados da De Beers [7] para o corte em granito com uma serra circular de diâmetro $\phi = 0,7 \text{ mm}$, com composto diamantado de volume $v = 1,7 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ e perímetro $\lambda = 1,7 \text{ mm}$ ($v = 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}$; usando diamantes DAS 100,40/50 mesh na concentração 30, em matriz de cobalto). A capacidade de corte medida para a serra circular foi de $0,62 \text{ m}^2$ resultando em $0,62/1,7 = 0,35 \text{ m}^2/\text{m}$. Para mármore, a capacidade de corte é dobrada ($0,73 \text{ m}^2/\text{m}$). A capacidade de corte do fio à base do composto produzido neste trabalho ($0,54 \text{ m}^2/\text{m}$ para um volume diamantado de $v = 1,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3$) é 4,4 vezes superior do que os resultados da De Beers [$(0,54/1,7 \times 10^{-6})$: $(0,73/10^{-5})$]. É reconhecido que o ponto crítico é a aderência entre os diamantes e a matriz. É provável que o uso de diamantes metalizados aumente a capacidade de corte dos fios produzidos.

Uma nova característica destes fios produzidos é a possibilidade de serem soldados após a quebra, sendo reusáveis. A Figura 8.d mostra o aspecto de uma região de solda prata do fio produzido ($\phi = 1,69 \text{ mm}$), após quebra durante operação de corte. A resistência mecânica é mantida (tensão máxima de ruptura de 226 MPa) na área soldada, constatado por ensaios de tração, e os diamantes desta região permanecem aderidos à mesma. Esta característica é um considerável avanço sobre os fios perolados convencionais, os quais são normalmente descartados após a sua ruptura.

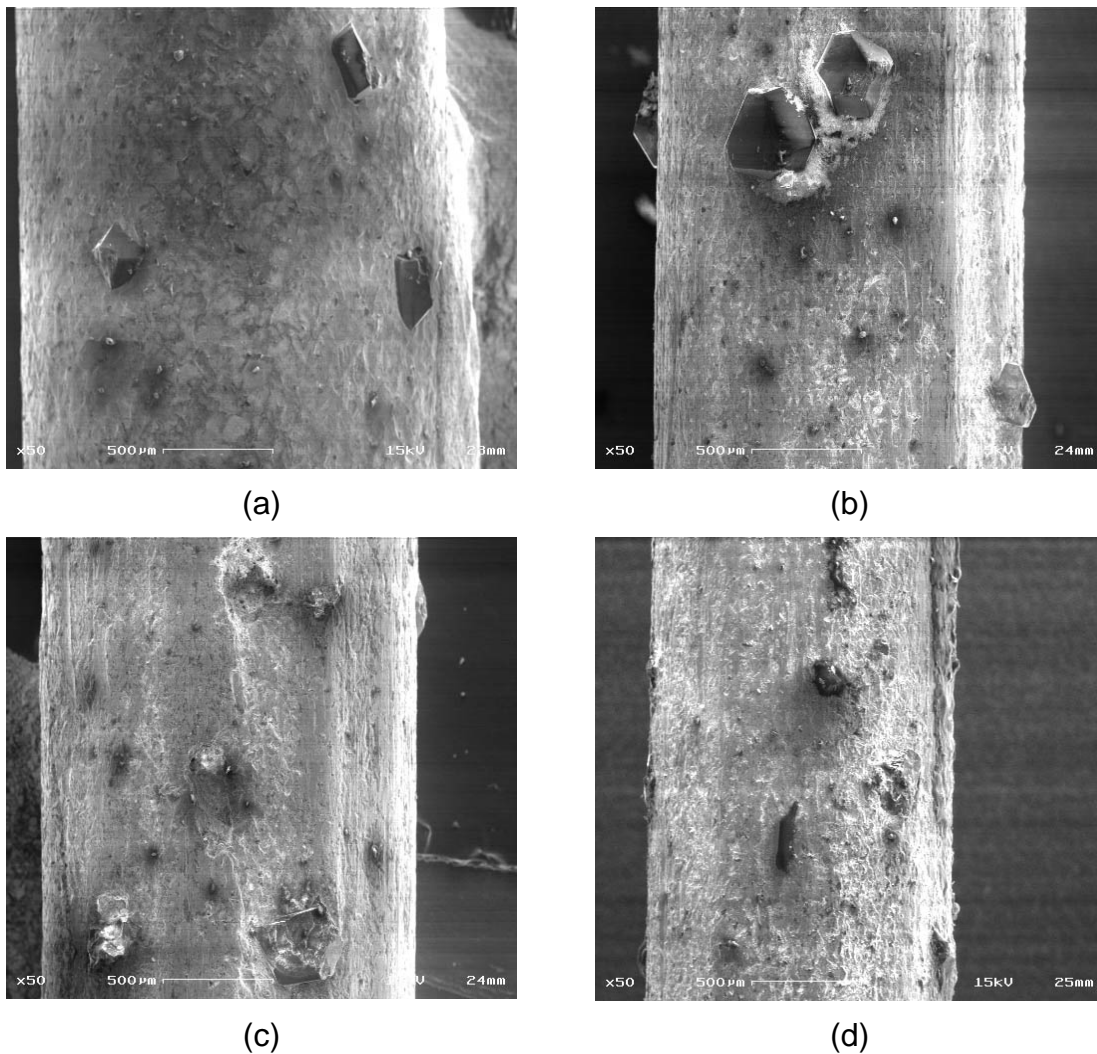


Figura 8: Corte em mármore com os fios produzidos. (a) Antes da operação de corte, $\phi = 1,93 \text{ mm}$. (b) Após o corte de uma área $A = 605 \text{ cm}^2$, $\phi = 1,61 \text{ mm}$. (c) Após o corte de uma área $A = 1180 \text{ cm}^2$, $\phi = 1,23 \text{ mm}$. (d) Junção de solda prata no fio produzido.

4 CONCLUSÕES

1. A fabricação de fios diamantados por uma rota tecnológica alternativa, denominada “In Situ”, empregou técnicas de metalurgia do pó e sinterização e forjamento rotativo (*swaging*), com a manutenção da integridade física dos cristais de diamantes. Através desta rota foi possível processar compósitos diamantados para aplicação direta como fios diamantados, ou em substituição a serras diamantadas de corte em geral.
2. A abrasão da matriz de bronze foi elevada, indicando a necessidade do desenvolvimento tecnológico em duas direções: (1) uso de diamantes metalizados visando melhorar a aderência, (2) bem como o uso de outros sistemas ligantes, tais como W-Co ou Fe-Co.
3. A resistência a tração medida para os fios “In Situ” foi bastante satisfatória do ponto de vista de sua aplicação como fio diamantado e serra linear.
4. A aderência entre o par bronze-diamante foi insuficiente. Isto se deve ao fato de que os cristais de diamantes utilizados neste trabalho não foram previamente metalizados.
5. A junção dos fios quebrados através de solda prata foi satisfatória, permitindo a constante reciclagem dos fios “In Situ”.
6. A provável performance dos fios “In Situ” no corte em mármore foi de cerca de 4 vezes superior ao dos discos diamantados convencionais; porém foi da ordem de 5 a 8 vezes inferior do que o dos fios diamantados perolados convencionais, devido à baixa resistência à abrasão da matriz de bronze, e baixa aderência entre o par bronze-diamante.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelos suportes financeiros concedidos.

6 REFERÊNCIAS

- [1] FILGUEIRA, M., PINATTI, D.G., “Production of Diamond Wire by Cu 15%v Nb ‘In Situ’ Process”, *In: 15th International Plansee Seminar*, Reutte/Austria, Plansee Holding AG, v. 1, pp. 360-374, 2001.
- [2] PRZYKLENK, K., “Diamond Impregnated Tools – Uses and Production”, *IDR – Toolmaking*, v. 4, pp. 192-195, 1993.
- [3] FILGUEIRA, M., *Produção de Fios Diamantados ‘In Situ’*, Tese D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF/LAMAV, pp. 157, 2000.
- [4] CONTARD, G.L., “Wire Beads – Economic Productions”, *IDR – Toolmaking*, v. 5, pp. 256, 1993.
- [5] “Annual Book of ASTM Standards”, Section 3 – *Chemical Analysis of Metals and Metal Bearing Ores*, v. 03.3, 1984.
- [6] “Annual Book of ASTM Standards”, Section 3 – *Metals Testing Methods and Analytical Procedures*, v. 03.01, 1985.
- [7] Diamond Wear, “Diamond in Industry”, *Stone – De Beers*, pp. 40-43, 1985.