

# DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA ROTA DE PROCESSAMENTO DE FERRAMENTAS DIAMANTADAS: METALURGIA DO PÓ E SWAGE<sup>1</sup>

Marcello Filgueira<sup>2</sup>  
Daltró Garcia Pinatti<sup>3</sup>

## 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 provável desempenho da ordem de 4 vezes superior ao dos discos diamantados de corte, contudo, seu provável 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-chave:** Tecnologia "In Situ"; Swaging; 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 compaction, sintering and rotary forging techniques. Tensile tests were performed, reaching an ultimate tensile strength of 230MPa for the diameter of  $\varnothing=1.84$ 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.

**Key words:** "In Situ" technology; Swaging; Sintering; Diamond composite

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

<sup>2</sup> Universidade Estadual do Norte Fluminense. Laboratório de Materiais Avançados. Av. Alberto Lamego, 2000. Campos dos Goytacazes/RJ. 28015-620. Fone (0XX22)2726-1626, Fax (0XX22)2726-1533. marcello@uenf.br

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia de Materiais. DEMAR/FAENQUIL. Polo Urbo Industrial. Gleba A16. Lorena/SP. 12600-000.

## 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.<sup>(1)</sup> 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.<sup>(2)</sup> 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.<sup>(2,3)</sup>

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, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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.<sup>(2)</sup>

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,<sup>(4)</sup> 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, batizada Tecnologia "In Situ", a qual envolve sinterização convencional e swaging (forjamento rotativo) 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.

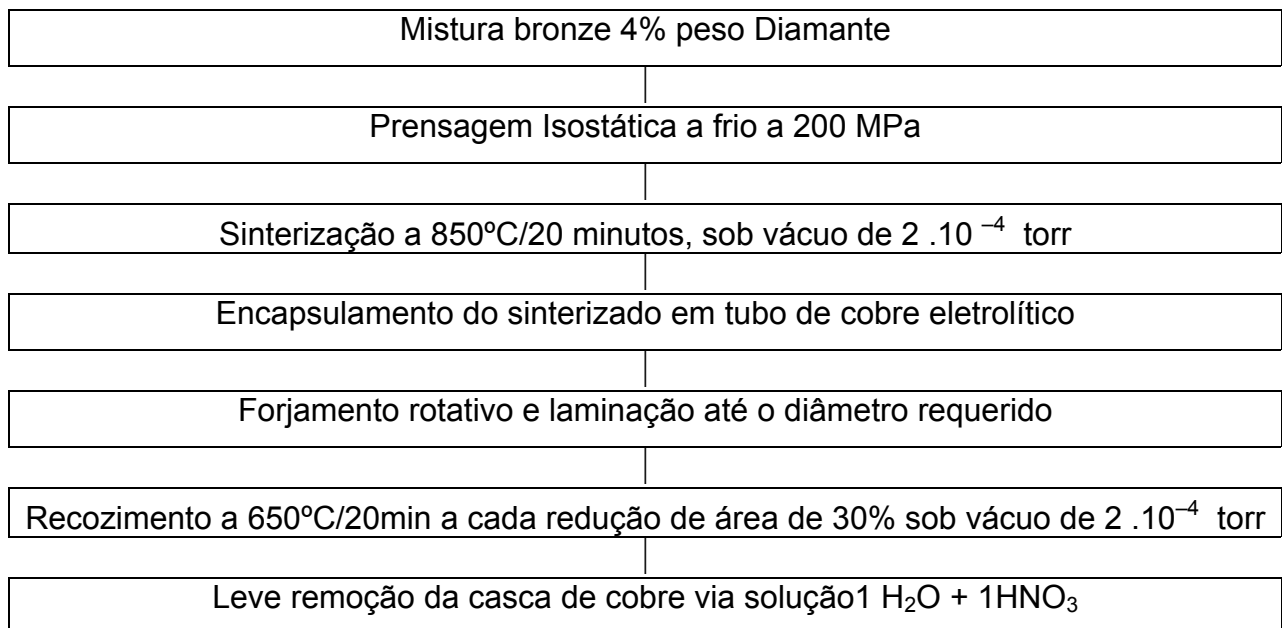
## METODOLOGIA

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/cm<sup>3</sup> = 0,44g/cm<sup>3</sup> = 0,13cm<sup>3</sup> de diamantes/cm<sup>3</sup> 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 processamento 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 <sup>3</sup> de volume abrasivo		Volume de diamante(cm <sup>3</sup> )/ cm <sup>3</sup> 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 cm<sup>3</sup>, e tem como base 4,4 quilates de diamantes/cm<sup>3</sup>. 1 quilate = 0,2 gramas. O n<sup>o</sup> 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 ( $\rho_{DIAM.} = 3,48\text{g/cm}^3$ ).



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

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

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

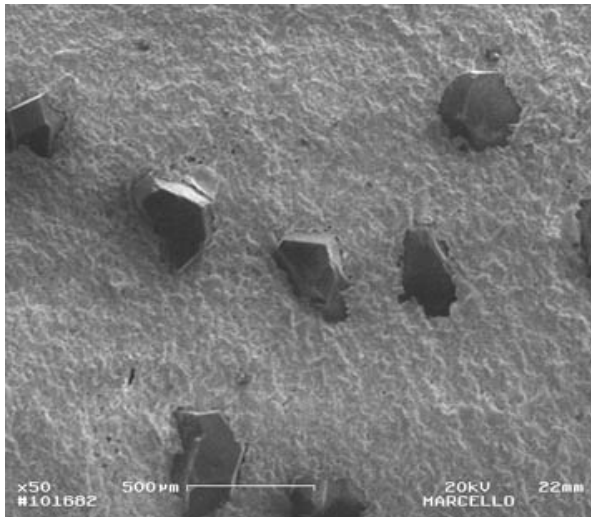
---- ausente.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Microestrutura e Comportamento Mecânico

A Figura 2 mostra o aspecto microestrutural da secção longitudinal do sinterizado inicial (antes do swaging) de bronze 4 % em peso diamantes at  $\varnothing=8.00\text{mm}$ . 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.

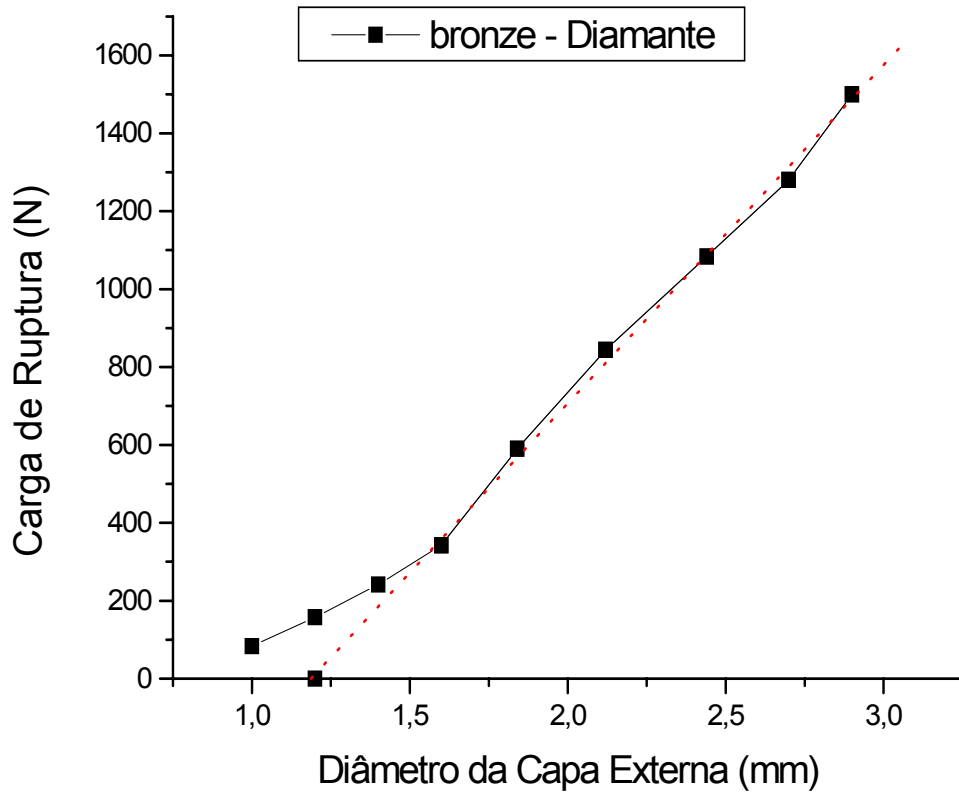
Para o compósito bronze 4% em peso diamante, a carga de ruptura é mostrada em função do diâmetro do fio, ao longo dos vários estágios de seu processamento (fig.4). A curva da Figura 4 não extrapola a zero, mas para  $\varnothing=1.20\text{mm}$ , cujo diâmetro é o limite do contato entre cristais diamante-diamante. 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 UTS permanece constante em 230MPa, até  $\varnothing=1,84\text{mm}$ , após o qual a UTS decresce. Os dados da Figura 8 se referem aos valores de UTS 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,  $UTS=260\text{MPa}$  e  $E=16\text{GPa}$ .<sup>(3)</sup> A presença de diamantes nos fios de diâmetros superiores a  $\varnothing=1,84\text{mm}$  apresentam menor influência na UTS, 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).



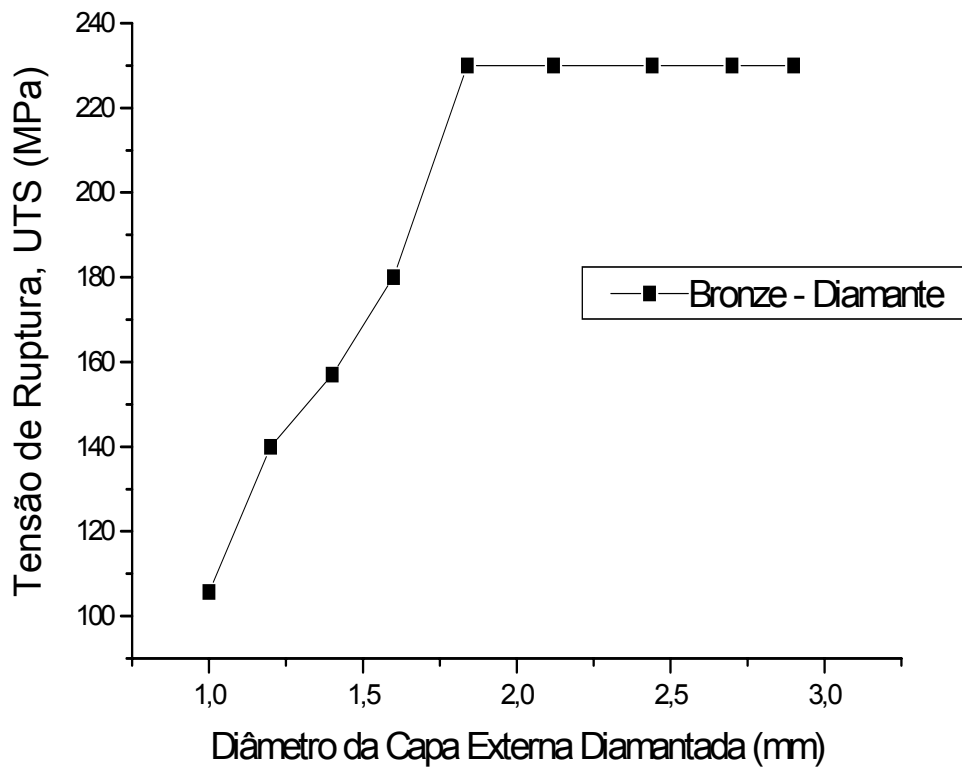
**Figura 2.** Secção longitudinal do sinterizado bronze 4% em peso diamante.  $\varnothing=8,00\text{mm}$ .



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



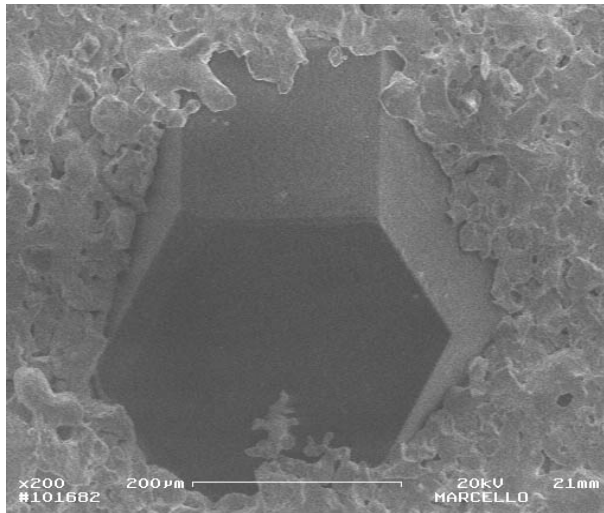
**Figura 4.** Carga de ruptura (N) & diâmetro do fio do compósito diamantado (mm).



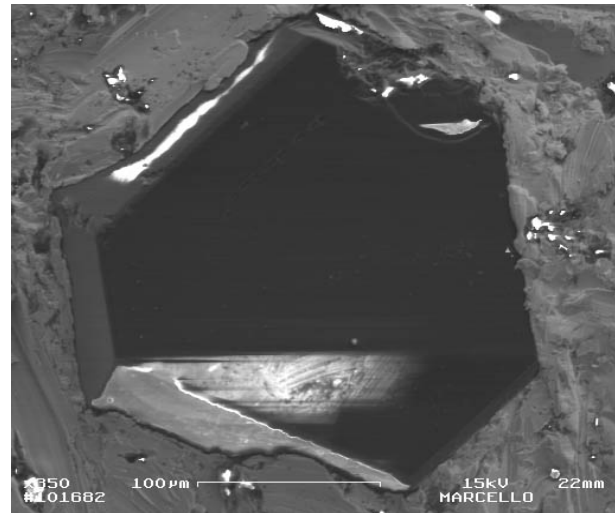
**Figura 5.** Tensão de ruptura (MPa) & diâmetro do compósito diamantado (mm).

## 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 pode-se 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 resistência à tração  $\text{UTS}=230\text{MPa}$  do compósito bronze 4% em peso diamante.



**Figura 6.** Vista de um cristal de diamante embebido na matriz de bronze.



**Figura 7.** Interface bronze-diamante.  $\varnothing=5,00\text{mm}$ . Vista longitudinal.

## 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 pedaços de  $0,22\text{m}$  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 observa-se uma rápida degradação do bronze. Aliado a isto, pode-se também observar que os cristais de diamantes se soltam facilmente da matriz, o que diagnostica um fraco trabalho de adesão. Outra comparação pode ser feita com os resultados da De Beers<sup>(7)</sup> para o corte em granito com uma serra circular de diâmetro  $\phi = 0,7 \text{ mm}$ , com compósito 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 compósito 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 X 10<sup>-6</sup>): (0,73/10<sup>-5</sup>)]. 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 aqui produzidos.

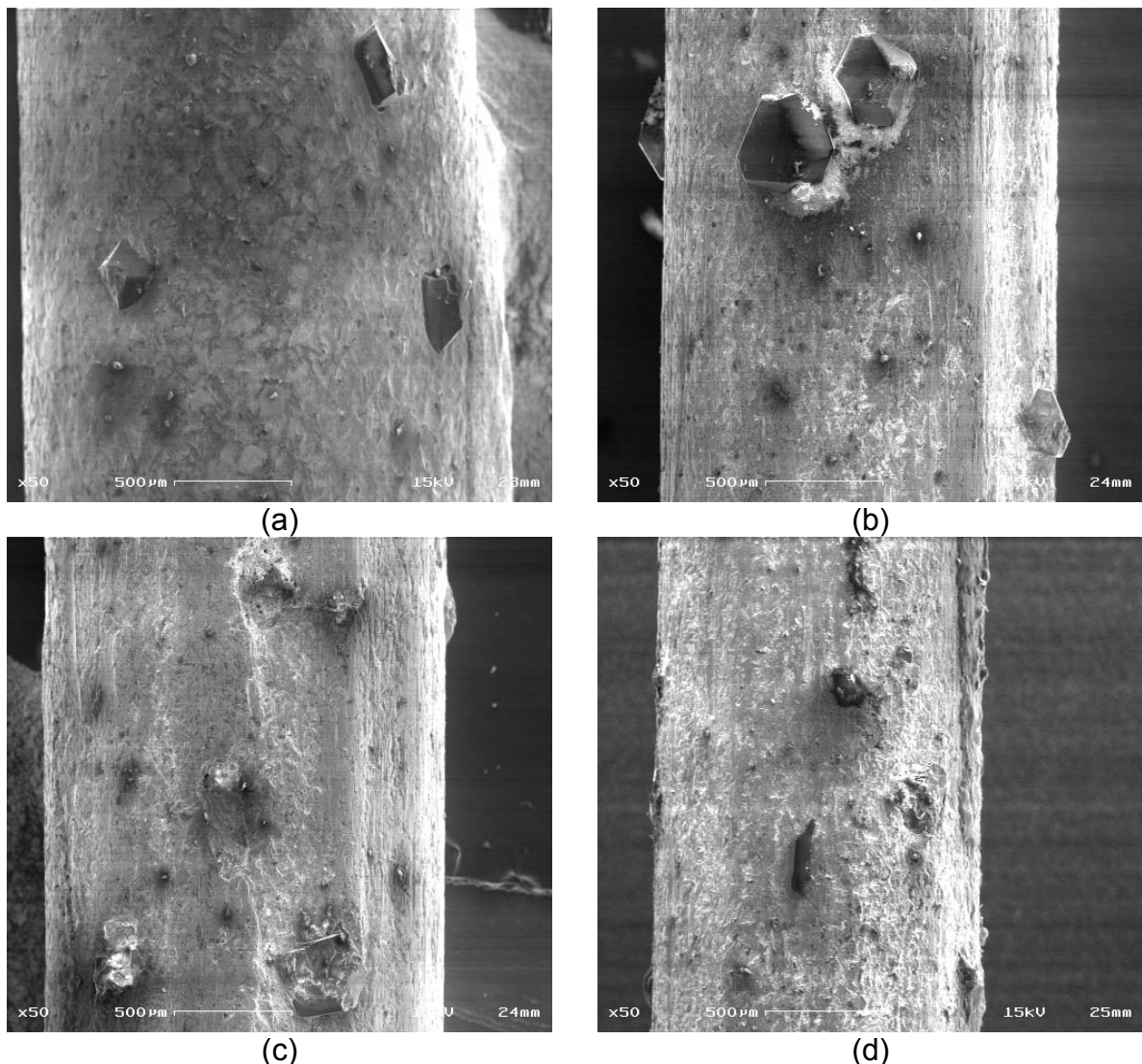
Uma nova característica destes fios produzidos é a possibilidade de serem soldados após a quebra, sendo reusáveis. A Figura 8.d mostra o aspecto de uma região de solda prata do fio produzido ( $\phi = 1,69$  mm), após quebra durante operação de corte. A resistência mecânica é mantida (UTS = 226 MPa) 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.

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

N	$\phi$ , mm	$\sigma$ , mm	$\pm \epsilon$ , mm	A, cm <sup>2</sup>
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 $\phi$ durante o corte	$\epsilon$ - erro = $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$
$\phi$ - diâmetro médio $\phi = (\sum \phi_i)/N$	$\sigma$ - variância: $\sigma = \frac{(\sum [\phi_i - \phi]^2)^{1/2}}{(N - 1)^{1/2}}$



**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.

## CONCLUSÕES

- 1) Um fio diamantado foi fabricado por uma rota tecnológica alternativa, batizada “In Situ”, a qual 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 deve-se 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) O 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.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao DEMAR/Faenquil. O primeiro autor agradece ao CNPq por financiar o presente trabalho, via projeto nº475465/03-2.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 M. Filgueira; D. G. Pinatti, Production of Diamond Wire by Cu 15%v Nb “In Situ” Process. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Plansee Seminar, Reutte/Austria, Plansee Holding AG, v.1 (2001), pp.360-374.
- 2 K. Przyklenk, Diamond Impregnated tools – Uses and Production. Toolmaking, Industrial Diamond Review, ed. De Beers, v.4 (1993), pp.192-195.
- 3 M. Filgueira, Produção de Fios Diamantados “In Situ”. PhD. Thesis, Universidade Estadual do Norte Fluminense (2000), pp. 1-153.
- 4 G. L. Contardi, Wire Beads – Economic Productions. Toolmaking, Industrial Diamond Review, ed. De Beers, v.5 (1993), p.256.
- 5 Annual Book of ASTM Standards, section 3 – Chemical Analysis of Metals and Metal Bearing Ores. v.03.03 (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, ed. De Beers (1985), pp. 40-43.