

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITO ABRASIVO DE DIAMANTE-Si OBTIDO POR SINTERIZAÇÃO CÍCLICA EM APAT*

Getúlio da Silva Abreu¹
Ana Lúcia Diegues Skury²
Guerold S. Bobrovitchii³

Resumo

O objetivo geral deste trabalho foi produzir e caracterizar as propriedades mecânicas de um compósito abrasivo nanoestruturado no sistema D-Si, via sinterização cíclica de alta pressão e alta temperatura (APAT). A sinterização cíclica em alta pressão e alta temperatura de compósitos foi feita a partir de uma mistura de 70% diamante e 30% de Si como ligante, e com 1 a 4 ciclos de pressão (P) de 7GPa-4GPa e temperatura (T) 1600°C-300°C, para um tempo (t) de 1min. O aumento do número de ciclos gerou razoável elevação na microdureza e densidade das amostras. Os valores médios de tenacidade à fratura ficaram entre 8,86 e 9,43 MPa.m^{1/2}. No ensaio de desgaste o aumento do número de ciclos diminuiu a perda de massa das amostras no disco de granito. As curvas termogravimétricas apresentaram uma boa estabilidade térmica dos compósitos até a temperatura de 660°C. Finalmente, por meio deste trabalho será possível melhorar a produção de futuros compósitos abrasivos no sistema D-Si.

Palavras-chave: Compósitos diamantados; Propriedades mecânicas; Sinterização cíclica.

MECHANICAL PROPERTIES OF DIAMOND-Si ABRASIVE COMPOSITES OBTAINED IN HPHT SINTERING CYCLIC

Abstract

The aim of this work was to produce and characterize the mechanical properties of a nanostructured composite abrasive in Diamond-Si system, via high pressure high temperature (HPHT) cyclic sintering. Cyclic sintering at high pressure and high temperature composites is made from a mixture of 70% diamond and 30% Si as a binder and 1 to 4 pressure cycles (P) 7GPa-4GPa and temperature (T) 1600°C-300°C for a time (t) of 1 min. The increase in the number of cycles generated reasonable increase in the microhardness and density of the samples. The mean values of fracture toughness were between 8.86 and 9.43 MPa.m^{1/2}. In the wear test, the increase in the number of cycles decreased the weight loss of the granite disc samples. The thermogravimetric curves showed good thermal stability of the composite to the temperature of 660°C. Eventually, through this work should increase the production of abrasive composites in future D-Si system.

Keywords: Diamond composites; Mechanical properties; Cyclic sintering.

¹ Engenheiro, Doutorando, LAMAV/Setor de Materiais de Alta Dureza, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil.

² Bacharelado e Licenciatura em Física, Doutora, Professora, LAMAV/Setor de Materiais de Alta Dureza, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil.

³ Engenheiro, PhD, Professor Emérito, LAMAV/Setor de Materiais de Alta Dureza, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil

1 INTRODUÇÃO

A indústria metal-mecânica busca encontrar ferramentas eficientes nos processos de usinagem de materiais. Sabe-se que o componente mais duro que existe é o diamante. Porém, como é muito caro fabricar ferramentas de diamante puro, uma saída encontrada foi utilizar materiais com características superduras, com menor custo, e que alcance propriedades desejadas próximas a do diamante natural.

As ferramentas fabricadas com materiais superduros possuem muitas aplicações, entre as quais se destacam as ferramentas de corte, nas serras lineares e circulares, e nos processos de perfuração de poços de petróleo com insertos de compósitos diamantados nas brocas, na usinagem de aços duros, na usinagem de desbaste e de acabamento, em cortes severos e interrompidos de materiais, em peças fundidas e forjadas etc.

Particularmente, um dos grandes problemas encontrados nas ferramentas utilizadas na perfuração de rochas na indústria petrolífera refere-se à baixa tenacidade e baixa estabilidade térmica dos insertos [1].

O diamante é o material natural mais duro que existe. Os átomos de carbono formam ligações covalentes muito curtas, mas bastante estáveis; além do mais, estão dispostos numa estrutura cristalina que por sorte forma uma pirâmide perfeita [2]. A altíssima dureza que o diamante apresenta se deve a intensidade das forças de ligação entre os átomos de carbono (ligações covalentes).

Sob uma pressão normal, o silício tem estrutura do diamante com parâmetro de rede $a=0,54307\text{nm}$. A sua temperatura de fusão diminui sob pressão no intervalo de 10-4 GPa até 11,5 GPa de 1.415°C até 730°C [3].

A sinterização com parâmetro cíclico refere-se à prática de sinterização, porém com uso de ciclos alternados, por exemplo, de pressão e temperatura. É possível manter os parâmetros fixos durante certo tempo de ciclo, em geral, da ordem de alguns minutos. Podem ser considerados como parâmetros: pressão(P), corrente elétrica(I), voltagem(V), potência(P) e resistência(Ω) [4].

O objetivo geral deste trabalho foi analisar as propriedades mecânicas de compósitos nanoestruturados de diamante e silício, obtidos através de sinterização cíclica de altas pressões e altas temperaturas (HPHT). Os seguintes experimentos foram realizados: a) ensaio de desgaste, b) ensaio de compressão; c) ensaio de microdureza; d) tenacidade à fratura; e) análises térmicas: termogravimétrica (TGA) e Térmica Diferencial (ATD).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na preparação dos compósitos foram: a) diamante com granulometria 15/106 μm , produzido no setor de Materiais Superduros do Laboratório de Materiais Avançados da UENF (SMSD/LAMAV/UENF); b) Silício Aldrich 100 μm .

Para preparar a mistura reativa, feita a pesagem dos pós de diamante e silício na proporção de 70% de diamante e 30% de silício. Em seguida, a mistura foi submetida ao processo de Moagem de Alta Energia (MAE). Esta composição foi determinada a partir de estudos anteriores [5]. É importante saber que o diamante e o silício utilizados na preparação da mistura foram moídos ao mesmo tempo, a fim de minimizar esta contaminação.

Depois de fazer a moagem, o material obtido foi dividido em porções de aproximadamente 3,0 g e a mistura reativa, foi submetida à pré-compactação por compressão uniaxial de 500 MPa em matriz de aço, na prensa hidráulica de 20 t,

modelo LA4C 100B da L&a Indústria e Comércio Ltda. O compacto verde foi colocado cuidadosamente no interior do tubo aquecedor, que tem selo com discos de grafite. A etapa final foi constituída pela instalação do conjunto no interior da cápsula deformável.

2.1 Execução da Sinterização

A sinterização foi realizada numa prensa especial de 630 t de força, modelo 138 B, equipada com dispositivo de alta pressão do tipo bigorna com concavidade toroidal. O processo de sinterização se baseia na aplicação de ciclos, no que diz respeito aos parâmetros de pressão e temperatura. O objetivo de ser utilizar a sinterização cíclica foi avaliar se os ciclos e o tempo de processamento influenciam consideravelmente na qualidade dos compósitos sinterizados, para desta forma, investigar os MCDs.

Para iniciar a sinterização, o primeiro passo foi montar a cápsula deformável com a mistura reativa de diamante e silício. Depois, foi necessário efetuar a calibração de temperatura e pressão.

A aplicação da pressão foi feita em patamares diferentes, onde durante a sinterização a pressão foi elevada a 7 GPa e mantida nesse patamar de pressão enquanto a corrente elétrica foi acionada, a fim de se alcançar a temperatura de aproximadamente 1600°C. Esses parâmetros foram mantidos constantes por um período de 1min, após o qual o aquecimento é desligado e a pressão cai até o valor de 5 GPa, também por 1 min. Então novamente é aplicada a pressão e a corrente elétrica repetindo o processo formando, caracterizando os ciclos.

O processo de sinterização foi avaliado com variação de 1, 2, 3 e 4 ciclos de 1 min cada. A intenção em se usar a sinterização cíclica foi verificar se as variações dos ciclos são capazes de melhorar significativamente a qualidade dos compósitos abrasivos diamantados produzidos.

2.2 Ensaio de Desgaste

O objetivo do ensaio foi determinar a resistência ao desgaste abrasivo dos compósitos sinterizados. Os ensaios foram feitos num equipamento do tipo pino-contra-disco, da marca AROTEC/AROPOL. E os resultados foram expressos em porcentagem de massa removida do compacto e do disco abrasivo de granito.

Os seguintes procedimentos foram realizados: a) As amostras foram pesadas em uma balança analítica da marca SCALTEC antes do início dos testes. Depois, as amostras foram fixadas no suporte da máquina perpendicularmente à superfície do disco abrasivo de granito; b) Uma carga de 9,8N foi colocada sobre a amostra que comprime o disco de granito; c) O disco de granito foi posto a girar em sentido horário com velocidade constante de 450 rpm, utilizando a água como lubrificação e refrigerante numa vazão de 0,5 L/min, durante 10 min; d) Ao término do tempo de desgaste, compacto e o disco de granito foram secos durante 1h na estufa, e em seguida, resfriados num dessecador; e) Os compactos e o disco abrasivo de granito foram novamente pesados. As pesagens antes e depois dos ensaios, das amostras e do disco de granito foram repetidas quatro vezes e os valores médios foram adotados para representar o resultado; f) As perdas de massa das amostras e do disco de granito foram determinadas (Equação 1):

$$\% \Delta \text{Massa} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde m_i e m_f são, respectivamente, massas antes e depois do ensaio.

g) A resistência à abrasão foi medida através da Equação 2:

$$RA = \frac{1}{\% \Delta \text{Massa}} \cdot 100 \quad (2)$$

2.3 Ensaio de Compressão

Para a realização do ensaio de compressão foi utilizada a máquina de ensaios mecânicos Instron modelo 5582. Neste ensaio registrou-se a relação entre a força compressiva aplicada e a deformação sofrida pelo corpo de prova até a sua destruição. Foram realizados testes de compressão axial e compressão diametral para determinar a tensão de tração (Equação 3).

$$\sigma_{tr} = \frac{2F}{dh} \quad (3)$$

Onde: σ_{tr} = Tensão de tração (N/m^2); F = Força aplicada (N); d = diâmetro da amostra (m); h = Altura da amostra (m).

2.4 Ensaio de Microdureza

A dureza é uma propriedade mecânica importante a ser considerada, pois é a medida a resistência de um material a uma deformação plástica localizada. O material que é submetido a teste de dureza, irá sofrer fluxo plástico em função da pressão média a que estiver sendo submetido, podendo essa pressão média ser correlacionada diretamente com sua dureza. Existe uma estrita relação entre os valores de dureza e a curva característica de tensão por deformação o material [6]. Neste trabalho as medidas de microdureza Vickers foram realizadas utilizando microdurômetro Shimadzu Type M com carga 9,81N. Realizaram-se em torno de dez medições na superfície de cada amostra para obter uma média dos valores. A microdureza é importante porque está relacionada a notáveis propriedades do material em estudo ou aspecto de desempenho deste incluindo abrasão, usinagem e outros.

2.5 Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura de um material é a resistência do material à propagação de trincas, sendo caracterizada por um fator crítico de intensidade de tensão (K_{Ic}) como valor limite de intensidade de tensão que pode ser aplicado a um material, onde ocorrerá a propagação de trincas [7].

Segundo a teoria de Griffith, pode ser definido como um Fator de Intensidade de Tensão (K) que estabelece a magnitude do campo de tensão causado por uma trinca, ou seja, depende da geometria e tamanho da trinca e da intensidade da carga aplicada. Existem variadas funções que definem este fator K como pode ser visto na Equação 4 [8]:

$$K = f(\sigma, a) \quad (4)$$

Onde: a = dimensões da trinca e σ = tensão.

A fratura frágil é especificada através do valor crítico do fator de intensidade de tensão, que é conhecido como tenacidade à fratura (K_{Ic}). Geralmente o fator K_{Ic} é utilizado ao que se refere a um modo específico de fratura: a plana.

Como antes mencionado existem diferentes maneiras de se obter o valor de K_{Ic} , para isso são utilizadas as indentações e trincas que se formam nas amostras durante as medidas de microdureza e a carga aplicada, como pode ser observado na figura 23. A medida de K_{Ic} é obtida através da Equação 5 e 6 [9].

$$K_{Ic} = 1,705 \times (W \times HV)^{0,16} \quad (5)$$

$$w = \frac{P}{L} \quad (6)$$

Onde: K_{Ic} = tenacidade à fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$); HV = dureza Vickers (kgf/mm^2); P = carga aplicada (kgf); L = somatório das trincas superficiais formadas (mm).

2.6 Análise Térmica

A análise térmica é um conjunto de técnicas que vai monitorar em função do tempo ou temperatura, as propriedades físicas e químicas dos MNCDs (materiais nanocompósitos dimantados), enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é submetida a uma programação controlada.

Neste trabalho as análises térmicas foram realizadas no equipamento BP300 da marca BP Engenharia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Descrição dos Compósitos Obtidos

Os compósitos obtidos foram de formatos cilíndricos com superfícies laterais ligeiramente côncavas. A altura ficou entre 4 e 5 mm e o diâmetro médio ficou 4 mm. As amostras apresentaram valores de massa em média de 0,21g, a redução na massa se deve a perdas ocorridas durante o processo de pré-compactação, na montagem da cápsula e também a contrações ocorridas durante o processo de sinterização (Tabela 1).

A sinterização dos compósitos foi realizada pela aplicação repetida de 1 a 4 ciclos de pressão (P) e temperatura (T) para um tempo (t) de 1 minuto, por exemplo, o gráfico com 4 ciclos (Figura 1). A variação cíclica da pressão e da temperatura com o tempo de processamento foi realizado por níveis alternados de 7GPa a 1600°C e 4GPa a 300°C.

Tabela 1. Descrição de compósitos sinterizados

Amostras	Repetições	Composição	Pressão	Temperatura	Tempo
get.1Cl	(a), (b), (c)	70% D-30% Si	7 GPa	1600 °C	1 ciclo/min
get.2Cl	(a), (b), (c)	70% D-30% Si	7 GPa	1600 °C	2 ciclos/min
get.3Cl	(a), (b), (c)	70% D-30% Si	7 GPa	1600 °C	3 ciclos/min
get.4Cl	(a), (b), (c)	70% D-30% Si	7 GPa	1600 °C	4 ciclos/min

3.2 Análise de Microdureza

A microdureza está ligada tanto com as resistências a tração e compressão quanto ao desgaste do material durante seu uso.

Nanocompósitos têm nitidamente maior dureza e maior tenacidade à fratura do que compactos de diamante puro. No entanto, não são tão duros como compósitos de diamante-SiC no tamanho de microns, feitos pelo método de infiltração. Suspeita-se que este é essencialmente o resultado de uma mistura inadequada. A melhoria dos procedimentos de mistura e a utilização do pó de silício com grãos menores podem aliviar este problema [10].

É possível observar que o aumento no número de ciclos conferiu uma sensível elevação nos valores de microdureza e de densidade aos compósitos sinterizados (Tabela 2). Os resultados indicam que a sinterização cíclica permitiu produzir compósitos nanoestruturados mais densos, ou seja, com menos porosidade e dureza maior.

Tabela 2. Valores de microdureza Vickers das amostras sinterizadas

Amostras	Qtde. de ciclos	Microdureza HV (GPa)	Densidade (g/cm ³)
get.1Cl	1	35,0	3,21
get.2Cl	2	38,0	3,40
get.3Cl	3	39,0	3,38
get.4Cl	4	39,5	3,49

Autores já encontraram valores de microdureza em torno de 35,7 GPa, o que demonstra que a microdureza encontrada neste trabalho superou em alguns pontos os valores encontrados na literatura [10].

3.3 Tenacidade à Fratura

Os valores de tenacidade à fratura (K_{IC}) (Tabela 3) para os compósitos com diferentes números de ciclos de sinterização. Em geral a tenacidade à fratura apresentou valores aproximados entre os compósitos de diferentes ciclos. Considerando os parâmetros utilizados, e que a tenacidade a fratura foi calculada com base no ensaio de microdureza os valores médios apresentados ficaram entre 8,86 e 9,43 MPa.m^{1/2}.

Tabela 3. Tenacidade à fratura das amostras sinterizadas

Amostras	Número de ciclos	K_{IC} (MPa.m ^{1/2}) Média
get.1Cl	1	9,30
get.2Cl	2	8,86
get.3Cl	3	9,29
get.4Cl	4	9,43

É comum a crença na correlação inversa entre a tenacidade à fratura e a dureza de materiais convencionais, porém estudos demonstram a importância da nanoestrutura para o reforço das propriedades mecânicas de materiais compósitos [10]. Por isso, os valores de tenacidade à fratura encontrados nesse trabalho demonstram estar dentro do esperado para materiais compósitos de Diamante-SiC nanoestruturados [10].

3.4 Ensaio de Compressão Diametral das Amostras Sinterizadas

No teste de compressão diametral, as amostras foram destruídas sob as cargas de aproximadamente 1477N amostra get.1Cl(b); 1978N amostra get.2Cl(b); 2000N amostra get.3Cl(b) e 1341N amostra get.4Cl(b). Os valores da tensão máxima de tração foram calculados a partir da Equação 3. Neste caso os valores de tensão para as amostras de diferentes ciclos estão dispostos na Tabela 4, onde demonstra um ligeiro aumento no valor de tensão para as amostras com 2 ciclos e 3 ciclos e uma queda para a amostra com 4 ciclos. A seguir o gráfico do ensaio de compressão diametral da amostra de 4 ciclos (Figura 1).

Tabela 4. Tensão máxima de tração após ensaio de compressão diametral.

Amostras	σ_{tr} (MPa)
1 ciclo	170,0
2 ciclos	222,0
3 ciclos	200,0
4 ciclos	162,5

Durante o ensaio de compressão diametral das amostras do material compósito diamantado nanoestruturado desenvolvido foi observado que o caráter da ruptura das amostras corresponde ao tipo de destruição frágil dos materiais com ligação covalente que não apresentam plasticidade macroscópica [11].

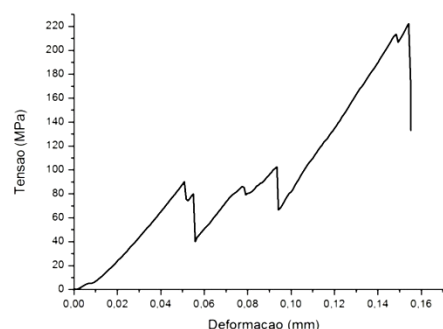


Figura 1. Teste de compressão diametral da amostra de 4 ciclos.

Como pode ser observado, houve a formação de pequenos picos na curva de tensão por deformação das amostras sinterizadas, isso se dá, pois durante o ensaio, como as amostras não foram retificadas, ocorreram pequenas fraturas na superfície das amostras durante a aplicação da carga, e essas fraturas foram detectadas pelo equipamento o que ocasionou a formação de picos, que representam a diminuição da carga (resistência) nos pontos de fratura.

3.5 Ensaio de Desgaste

Para a avaliação do comportamento mecânico das amostras em relação ao desgaste, quando em condições de serviço, foi feita a determinação da resistência à abrasão. Conforme descrito na metodologia para este ensaio as amostras foram acopladas a um abrasímetro e submetidas ao contato com disco de granito. Após cada ensaio as amostras foram pesadas para a determinação da perda de massa da amostra e posteriormente calcular o valor da resistência à abrasão. Cada ensaio durou um total de 10 min, com pausas a cada 5 min para pesagem. Os valores

obtidos de perda de massa (%) encontram-se na Figura 2, e os valores de resistência à abrasão estão na Tabela 5.

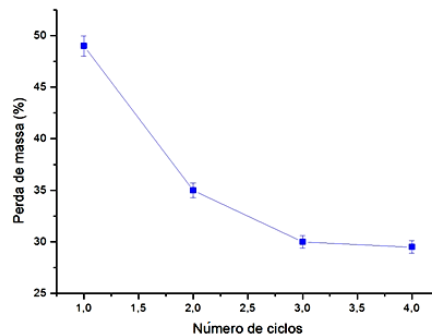


Figura 2. Relação entre a perda de massa (%) das amostras e o número de ciclos.

Como se observa na Figura 2, com o aumento do número de ciclos ocorreu uma diminuição na perda de massa das amostras no disco de granito. Há uma perda de peso distinta para amostras sinterizadas com ciclos diferentes, que podem ser atribuídas à densidade e a dureza exibida pelos compósitos nanoestruturados.

Tabela 5. Valores Médios para Resistência à Abrasão (RA)

Amostra	RA (%)
1 ciclo	2,01
2 ciclos	2,86
3 ciclos	3,29
4 ciclos	3,04

As amostras não foram retificadas para este ensaio, ou seja, foram testadas na forma “como recebidas”, portanto não foi corrigida nenhuma imperfeição na geometria das amostras. Com respeito à superfície do disco de granito, o ensaio não foi realizado numa mesma região, mas próximo ao centro do disco. E em cada novo movia-se em direção às bordas.

O mecanismo de desgaste de uma ferramenta diamantada impregnada é um processo contínuo, onde os diamantes expostos ou de maior altura de protrusão, podem ser destacados (*pull out*) da matriz ligante durante a operação de corte [12]. Isto pode ser verificado na Figura 3 da amostra de 2 ciclos, com detalhes feitos por setas vermelhas, indicando desprendimento de cristais de diamantes da matriz ligante. Isto provavelmente afeta o propriedades mecânicas dos compósitos. Ao assumir que os bons resultados de molhamento químico é um produto da forte interação entre diamante-ligante, é então esperado que exista uma boa adesão entre diamante e a matriz, que se traduz em elevada resistência mecânica [13].

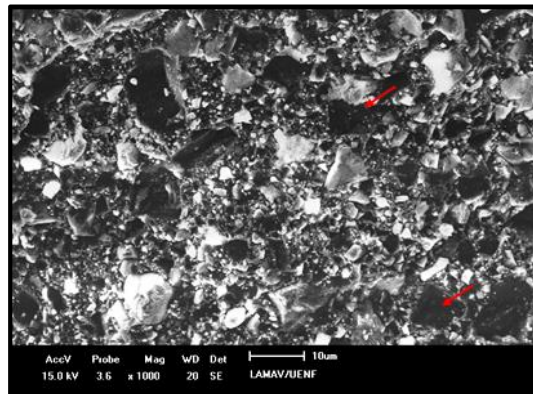


Figura 3. Micrografia com detalhe de “pull out” de alguns cristais de diamante da amostra get.2Cl(b).

3.6 Análise Térmica das Amostras Sinterizadas

A estabilidade térmica das amostras foi analisada usando a técnica termogravimétrica TGA e DTA. Na Figura 4 estão apresentados os termogramas correspondentes as análises das amostras de 1 ciclo(a), 2 ciclos(b), 3 ciclos(c) e 4 ciclos(d).

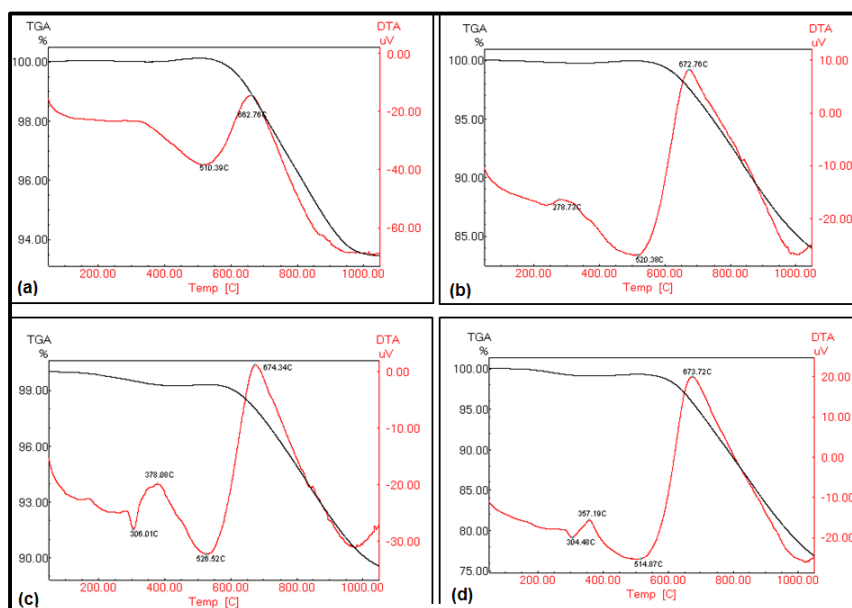


Figura 4. Análise térmica TGA e DTA das amostras: (a) 1 ciclo, (b) 2 ciclos, (c) 3 ciclos e (d) 4 ciclos.

As curvas termogravimétricas da Figura 4(a) e (b) mostram que para temperaturas de até 660°C não há praticamente nenhuma alteração do peso das amostras. Isto indica que os compósitos nanoestruturados de diamante são estáveis até esta temperatura. Durante mais de um ciclo de sinterização, há uma tendência de aumentar a estabilidade térmica. Este comportamento pode ser associado com o tamanho manométrico das partículas de diamante. A perda de peso indica que nem todos os diamantes foram oxidados. Isto pode ocorrer se as partículas de diamante são completamente incorporadas pela fase matriz, que os protege do contato com o oxigênio.

Todas as amostras apresentaram um pico exotérmico na faixa de temperatura de 662,76°C a 674,34°C esses picos provavelmente estão ligados à oxidação do diamante. Autores notaram em seus trabalhos que o diamante começa a oxidar em torno de 475°C até 875°C [14,15].

4 CONCLUSÃO

A Sinterização cíclica em alta pressão e alta temperatura de compósitos feita a partir de uma mistura de 70% diamante em conjunto com 30% de Si como ligante, o qual foram moídos inicialmente em partículas nanométricas, resultou num compósito mais denso. De uma maneira geral, houve um aumento na densificação e nos valores de microdureza dos compósitos com o aumento do número de ciclos, o que é indica que a sinterização cíclica produziu compósitos mais densos (menos porosos). Foram obtidos excelentes valores de tenacidade à fratura, que estão entre 8,86 e 9,43 MPa.m^{1/2}, esses valores estão dentro do esperado para materiais compósitos nanoestruturados diamantados de acordo com a literatura.

O caráter da ruptura das amostras sob carregamento no ensaio de compressão diametral corresponde à destruição frágil dos materiais com ligação do tipo covalente que não apresenta plasticidade macroscópica. A sinterização com 2 e 3 ciclos apresentaram maiores valores de tensão

A condição de sinterização que produz a melhor resistência ao desgaste refere-se ao processamento de materiais compósitos com mais de três ciclos de sinterização. As curvas termogravimétricas apresentaram uma boa estabilidade térmica dos compósitos até a temperatura de 660°C o que é um bom resultado. O aumento no número de ciclos de sinterização melhorou esse comportamento térmico, bem como as propriedades e resultou em menos porosidade.

REFERÊNCIAS

- 1 Skury, A. L. D., Azevedo, M. G., Bobrovnitchii, G. S. Effect of the carbon black nanopowder on the mechanical properties of B-Si-Cu-Diamond composite. In: IX Brazilian MRS Meeting, Ouro Preto. Proceedings IX Brazilian MRS Meeting, 2010. v. 1. p. 907-907.
- 2 Errandonea, D. Más duro que el diamante. Com altas presiones pueden conseguirse materiales sintéticos ultraduros com múltiples aplicaciones potenciales. Investigacion y Ciencia. 2009, p. 74-80, diciembre.
- 3 Yang, J., Hegbusi, O. J. (2000) Kinectis of silicon-metal alloy infiltration into porous carbon. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2000, n 31, p. 617-625.
- 4 Abreu, G. da S. Obtenção de compósito abrasivo no sistema D-Si utilizando sinterização cíclica em Altas Pressões e Altas Temperaturas. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.
- 5 Bobrovnitchii, G. S. *et al.* SiC infiltrated diamond composites. Materials Science Forum. 2008, v. 591, p. 654-660.
- 6 Sasso, M. Sinterização reativa no sistema B-Ti em alta pressão. 2008. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- 7 McKie, A. I. Mechanical properties of cBN-Al composite materials dependence on grain size of cBN and binder content. 2009. (Master degree of Science in Engineering). University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- 8 Garcia, A. et al. Ensaios de Materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2000. p. 165-176.
- 9 Hanyaloglu, C., Aksakal, B., Bolton, J.D. Production and indentation analysis of WC/Fe–Mn as an alternative to cobalt-bonded hardmetals. Materials Characterization Materials Characterization. 2001, 47: p. 315-322.
- 10 Voronin, G. A. et al. Diamond-SiC nanocomposites sintered from a mixture of diamond and silicon nanopowders, Diamond and Related Materials. 2003, n.12, p.1477-1481.

- 11 Lisovsky, A. F., Graclieva, T. E., Kulakovsky, V. N. Composites and properties of (Ti,W)-WC-Co sintered carbides alloyed by MMI process. Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials. 1995, v.13, p. 375-383.
- 12 Wright, D. N., Wapler, H. Investigations and Prediction of Diamond Wear When Sawing. 1986, In: Annals of the CIRP, V.35. n.1, p. 239-244.
- 13 He, D., He, M., Kiminami, C. S. J. Mater. Res. 2001, 4, 910.
- 14 Chang, Q. S. et al. Preferential oxidation of diamond. 2000, pp.2196 - 2199.
- 15 David, B. et al. Thermogravimetric analysis of the oxidation of multiwalled carbon nanotubes: Evidence for the role of defect sites in carbon nanotube chemistry. 2002, pp. 615 -618.