

OBTENÇÃO EFICAZ DE COMPÓSITO DE METAL DURO ATRAVÉS DE BALANÇO DE MASSA¹

Vinícius Martins²
Wilson Corrêa Rodrigues³
Lírio Schaeffer⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho é a obtenção de compósitos de metal duro com 10%, 15% e 20% de cobalto a partir de compósito comercial de WC-6%Co, através de balanço de massa. Determinou-se a quantidade de cobalto necessária para transformar o compósito comercial 94 WC – 6 Co em um compósito de 10%, 15% e 20% de Cobalto. Após os cálculos realizados, adicionou-se 1,5% de lubrificante ao compósito comercial juntamente com o cobalto, em um misturador em “Y”. Os compósitos com 10%, 15%, 20% Cobalto foram sinterizadas nas respectivas temperaturas 1.420°C, 1.400°C e 1.360°C. Para analisarmos a eficiência da mistura realizou-se ensaio de densidade, metalografia e microdureza.

Palavras-chave: Metal duro; Metalurgia do pó; Sinterização; Balanço de massa.

OBTAINING EFFECTIVE HARD METAL COMPOSITE THROUGH MASS BALANCE

Abstract

The objective this work is to obtain hardmetal composites with 10, 15 and 20 percent of cobalt from composite commercial WC-6% Co, through mass balance. It has been determined the quantity of cobalt need to transform the commercial composite 94WC-6Co on a composite of 10, 15 and 20 percent cobalt. After the calculations made, it added 1.5% of the commercial composite lubricant with the cobalt in a blender on "Y". The composite with 10, 15, and 20 percent of cobalt were sintered at their respective temperatures of 1420°C, 1400°C and 1360°C. In order to analyze the efficiency of the mixture was tested for density, metallography and microhardness.

Key words: Hardmetal; Powder metallurgy; Sintering; Mass balance.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av: Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. viniciushiper@yahoo.com.br

³ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av: Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. wilcor_br@yahoo.com.br

⁴ Professor Dr. Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Av: Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. schaefer@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

O Metal duro, desde o seu surgimento no início do século XX, vem cada vez mais ganhando mercado devido ao seu excelente desempenho contra desgaste e resistência a altas pressões, em função de ser um material composto de cerâmico aglomerado com um metal, que pode ser Níquel, Ferro ou mais comumente usado, o Cobalto.⁽¹⁾

Esta evolução, aliado a necessidade de um material de alto desempenho, levou o metal duro a transpor a exclusividade de sua utilização na usinagem. Este é usado em larga escala na conformação a frio em geral, como: extrusão, forjamento, estampagem, laminação. Também usados em selos mecânicos, matrizes e punções de compactação de pós-metálicos ou cerâmicos, e ferramentas de perfuração petrolífera, mostrando que o metal duro é uma liga para inúmeras utilizações.⁽²⁾

Deseja-se desenvolver através de balanço de massa três ligas de metal duro, com 10%, 15%, e 20% de cobalto. Depois de realizado o balanço de massa determinou-se as propriedades físicas e mecânicas para cada mistura do compósito como: densidade aparente, densidade à verde, contração volumétrica, contração linear, microdureza e metalografia.⁽³⁾

1.1 Estequiometria e Balanço de Massa

A palavra estequiometria vem do grego stoikheion (elemento) e metriā (medida, de metron). A estequiometria baseia-se na lei da conservação das massas, na das proporções definidas (composição constante), e também na lei das proporções múltiplas, em geral, as reações químicas combinam proporções definidas de compostos químicos. O termo "estequiometria" também é usado com frequência para as proporções molares de elementos em compostos estequiométricos. A estequiometria não é usada, tão somente, para balancear equações químicas, mas também para conversões de unidades. Outro uso é determinar a quantidade correta de reagentes a ser utilizada em uma reação química. A partir do uso geral da estequiometria restringiu-se apenas ao balanço de massa, pois neste caso não há reação química.⁽⁴⁾

Os balanços de massas ou balanços materiais são usados para fundamentar quantitativamente, as eficiências, os rendimentos, o dimensionamento de instalações e de equipamentos, etc. Para se determinar um balanço de massa eficiente, devem ser levados em conta os princípios de funcionamento deste como um sistema, um processo, uma fronteira, e a base de cálculo. O sistema é definido como um espaço selecionado, que pode ser sujeito à definição e apreciação de propriedades físicas.⁽⁵⁾

O processo é uma das etapas que promove mudanças das propriedades do sistema, esta classificação se baseia no procedimento de entrada e saída dos materiais, e podem ser classificados em batelada, contínua ou semicontínuo.⁽⁶⁾ As fronteiras são limites reais ou conceituais que separam o sistema do ambiente envolvente e a base de cálculo, que se refere quantitativa para a qual se processa o dimensionamento.⁽⁷⁾

1.2 Metalurgia do Pó e o Metal Duro

A metalurgia do pó desde o seu surgimento é um processo de produção, que cresce gradativamente, e envolve três etapas fundamentais, como a obtenção dos

pós, a compactação e a sinterização. A compactação é uma quantidade de pó, que é colocada na cavidade de uma matriz montada em uma prensa, podendo ser mecânica ou hidráulica. Com o aumento da compressão, o atrito do material contra as paredes da matriz e a fricção interna das partículas eleva a densidade do material aos valores desejados. Já a sinterização é a etapa de consolidação final da peça. A massa do pó é aquecida a temperaturas altas, mas abaixo do ponto de fusão do metal base, sob condições controladas de temperatura, velocidade de aquecimento e resfriamento, sob atmosfera controlada. O controle da atmosfera remove impurezas presentes, que podem alterar as propriedades físicas e químicas (principalmente a oxidação) do material, e atua de modo a manter uma condição de equilíbrio, impedindo a não formação de fases indesejáveis na liga presente no compactado.⁽⁸⁾

Metal duro é o nome dado ao compósito de um carboneto, aglomerado por um metal. Surgiu pela primeira vez no final da década de 20, na Alemanha, quando Karl Schröter conseguiu produzir em laboratório WC em pó, e misturou ao pó de cobalto. Após a compactação, ocorre o processo de sinterização, com uma temperatura suficiente para obter a fase líquida do aglomerante, que preenche os vazios entre os grãos dos carbonetos. A Tabela 1 mostra os compósitos de metal duro e suas respectivas densidades e microdurezas.⁽⁹⁾

Tabela 1: Densidade e microdureza da ligas de metal duro.⁽⁸⁾

Liga	Densidade g/cm ³	Microdureza HV 50
94WC-6Co	14,9	1.580
90WC-10Co	14,6	1.410
85WC-15Co	14,0	1.150
80WC-20Co	13,6	1.050

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizado nesse trabalho o pó de 94WC-6Co com 99% da composição, fornecido pela empresa ALFA AESAR, -325 Mesch, que serviu como matéria-prima, juntamente com o pó de cobalto -400 Mesch da mesma empresa. Nesse compósito foi adicionado estearato de zinco (1,5% em peso) como lubrificante. A Figura 1 mostra o pó do compósito comercial de WC-6Co, enquanto a Figura 2 mostra o pó de cobalto.

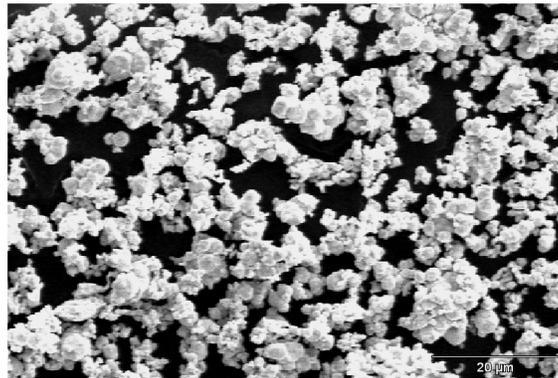


Figura1: Pó comercial de WC-6Co 1.500X.

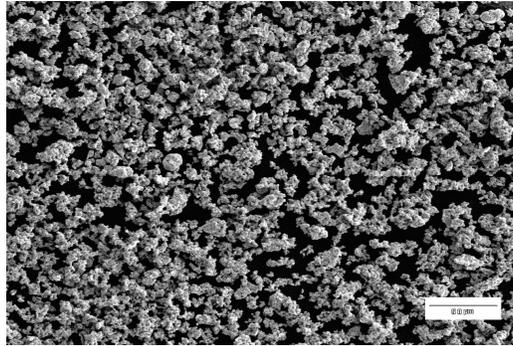


Figura 2: Pó de Cobalto -400 Mesh 300X.

Utilizou-se de uma balança de precisão para determinar o peso exato de pó, e um misturador em “Y” para homogeneizar a mistura do compósito comercial, e o pó de cobalto com tamanho de partícula menor que $37\ \mu\text{m}$, durante 30 minutos à 25 rpm, objetivando uma maior integração do particulado. Pesou-se 100 gramas do compósito comercial de 94 WC – 6 Co por ser uma quantidade satisfatória na realização dos testes. A partir do cálculo estequiométrico (balanço de massa) determinou-se a quantidade de cobalto a ser adicionado no compósito comercial de 94 WC – 6 Co. Após a mistura dos pós, utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura marca JEOL modelo 5800 para avaliar a homogeneização do compósito comercial de metal duro WC – 6 Co e o cobalto. Os pós foram colocados na cavidade da matriz para determinar a densidade aparente (g/cm^3) do compósito obtido pelo balanço de massa. O conhecimento dessa característica determina o verdadeiro volume ocupado por uma massa solta de pó. Em consequência, determina-se a profundidade da cavidade da matriz. Utilizou-se de uma matriz com 22,20 mm de altura e diâmetro de 14,00 mm, tendo um volume fixo de $3,41\ \text{cm}^3$, em um formado cilíndrico. Para a compactação foi utilizada uma matriz cilíndrica de aço temperado, utilizando-se de uma prensa hidráulica da marca Eka com capacidade máxima de 40 toneladas. A pressão de compactação utilizada foi 200 MPa.

Traçou-se a curva de sinterização para as amostras de WC com 6%, 10%, 15% e 20% de cobalto, levando em consideração a taxa de aquecimento, visto que, na literatura menciona-se que não se deva ultrapassar $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Outro aspecto levado em consideração e mantido nas curvas convencionais foi o tempo efetivo de sinterização de 60 min. Da temperatura ambiente até o patamar térmico de 580°C foi utilizada uma taxa de aquecimento de $5,75^\circ\text{C}$ por minuto, que serviu para eliminação do estearato de zinco, de 580°C até o patamar térmico de sinterização foi utilizado uma taxa de aquecimento de $5,3^\circ\text{C}$, por minuto. A taxa média de resfriamento no forno de $9,21^\circ\text{C}$ por minuto, até a temperatura ambiente.

A densidade também chamada de massa específica aparente foi determinada através do método de Arquimedes, conforme Norma MPIF-95, que se baseia no empuxo exercido sobre a amostra durante sua imersão em um recipiente com água acoplado a uma balança de precisão. Os diâmetros das amostras sinterizadas foram mensurados com um micrômetro marca Mitutoyo de 0 mm – 25 mm, juntamente com a altura. Determinou-se a contração linear das peças.

A medida de microdureza Vickers, segundo a norma ASTM E 384 – Standard Test Method for Microhardness of Materials, define o ensaio de microdureza, como a dureza de microindentações realizadas em equipamento calibrado com penetradores de diamantes de geometrias específicas. Foi realizado o ensaio no microdurometro do LAFUN – Laboratório de Fundação - UFRGS. Utilizando-se cargas de 1000 gf, sobre a superfície de ensaio do material para se medir as

diagonais das indentações óticas. As amostras foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura de marca JEOL 5800 com EDS acoplado, onde foram realizadas as metalografias e o EDS.

3 RESULTADOS

3.1 Densidade Aparente

A partir da liga pronta determinamos a densidade média aparente dos compósitos de metal duro, obtendo os valores em g/cm^3 , como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Densidade aparente das ligas de Metal duro

Liga	Densidade g/cm^3
94WC-6Co	2,57
90WC-10Co	2,63
85WC-15Co	2,55
80WC-20Co	2,45

3.2 Balanço de Massa

Utilizando o balanço de massa definiram-se os percentuais dos compósitos, adicionando 4,5; 10,5; 17,5 gramas de cobalto, com granulometria de – 400 Mesh, no compósito de 94 WC – 6 Co, transformando na ligas binárias em 90 WC – 10 Co, 85 WC – 15 Co e 80 WC – 20 Co, respectivamente, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Percentual de cobalto das ligas de Metal duro

Liga do Metal Duro	Percentual de Cobalto	Massa adicional de Cobalto (g)	Massa total do Cobalto (g)
94 WC – 6 Co	6	0	6
90 WC – 10 Co	10	4,5	10,5
85 WC – 15 Co	15	10,5	15,5
80 WC – 20 Co	20	17,5	23,5

3.3 Densidade à Verde

As densidades à verde dos compósitos de metal duro de 6, 10, 15 e 20% obtidas nos ensaios são demonstradas na tabela 4:

Tabela 4: Densidade à verde das ligas de Metal duro

Amostra	Liga de Metal Duro	Volume do compactado (cm^3)	Massa (g)	Densidade à verde (g/cm^3)
01	WC-6%Co	1,21	9,57	7,91
02	WC-6%Co	1,40	11,29	8,02
03	WC-6%Co	1,44	11,39	7,91
01	WC-10%Co	1,52	11,11	7,31
02	WC-10%Co	1,48	11,10	7,50
03	WC-10%Co	1,47	10,80	7,34
01	WC-15%Co	1,39	10,05	7,22
02	WC-15%Co	1,52	11,03	7,25
03	WC-15%Co	1,52	10,84	7,13
01	WC-20%Co	1,42	9,99	7,03
02	WC-20%Co	1,47	10,35	7,04
03	WC-20%Co	1,47	10,00	6,80

3.4 Sinterização

A Figura 3 mostra as curvas de sinterizações medidas, baseada na em uma curva convencional, medindo-se a cada 15 minutos, mostrando assim o comportamento do forno. A temperatura de sinterização indicada na figura é para os compósitos de WC-20Co, WC-15Co, WC-10Co, e WC-6CO, respectivamente.

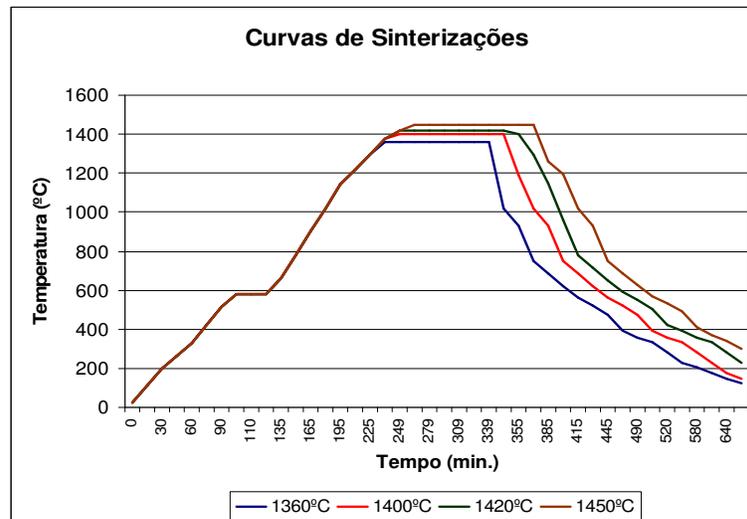


Figura 3: Curvas de Sinterizações dos compósitos de Metal duro.

3.3 Densidade do Sinterizado (g/cm³)

A medida da densidade do sinterizado é um aspecto muito importante a ser avaliado, pois se obtêm juntamente o valor de densificação. Após as sinterizações mediram-se as densidades das amostras utilizando-se o princípio de Arquimedes, conforme Norma MPIF-95. A Tabela 5 apresenta as densidades dos compósitos no formato cilíndrico. E a Figura 4 mostra a densidade relativa das composições.

Tabela 5: Densidade do sinterizado dos compósitos de Metal duro

Amostra	Liga de Metal Duro	Volume do sinterizado (cm ³)	Massa (g)	Densidade sinterizado (g/cm ³)
01	WC-6%Co	0,772	11,38	14,75
02	WC-6%Co	0,647	9,53	14,74
03	WC-6%Co	0,765	11,24	14,70
01	WC-10%Co	0,747	10,60	14,19
02	WC-10%Co	0,737	10,40	14,11
03	WC-10%Co	0,762	10,68	14,01
01	WC-15%Co	0,721	9,89	13,72
02	WC-15%Co	0,803	10,91	13,59
03	WC-15%Co	0,787	10,72	13,63
01	WC-20%Co	0,750	9,84	13,12
02	WC-20%Co	0,792	10,29	13,00
03	WC-20%Co	0,764	9,96	13,03

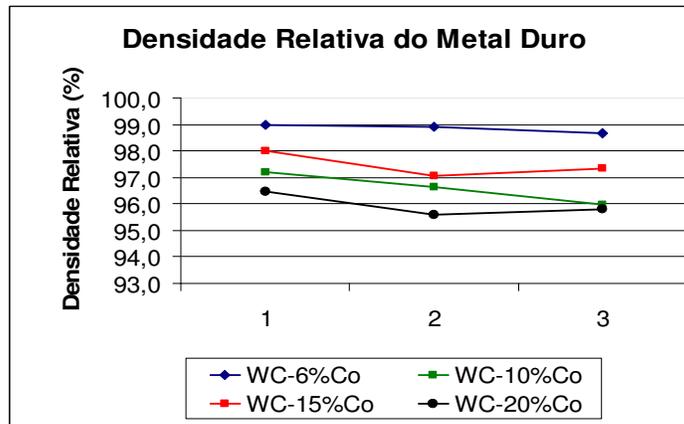


Figura 4: Densidade Relativa dos compósitos de Metal duro.

3.4 Contração

A Tabela 6 apresenta a média das contrações volumétricas e lineares dos compósitos por balanço de massa, após a sinterização. As figuras 5 e 6 mostram a redução volumétrica e linear em dois compósitos diferentes.

Tabela 6: Contrações volumétricas e lineares dos compósitos de Metal duro

Liga do Metal Duro	Contração Volumétrica (%)	Contração Linear (Altura) (%)	Contração Linear (diâmetro) (%)
94WC-6Co	45,9	17,4	19,7
90WC-10Co	49,8	21,9	19,7
85WC-15Co	48,2	18,0	19,7
80WC-20Co	47,1	18,7	19,7

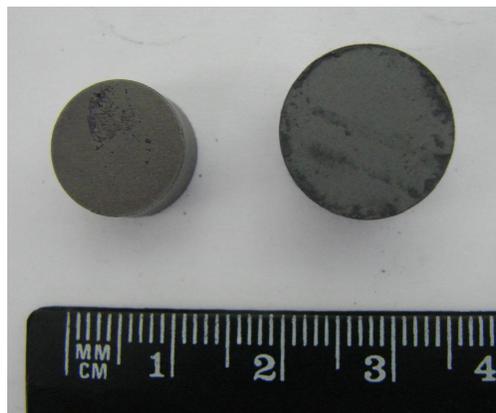


Figura 5: 1ª Amostra compactada e a 2ª amostra sinterizada. WC15-Co.

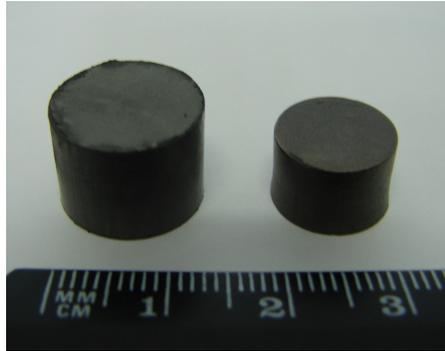


Figura 6: 1ª Amostra compactada e a 2ª amostra sinterizada. WC20-Co.

3.5 Microdureza

A obtenção das medidas de microdureza Vickers (HV), segundo a norma ASTM E 384 é apresentada na Tabela 7

Tabela 7: Microdureza do compósito de Metal duro.

Atmosfera e temperatura	Liga de Metal Duro	Carga (gf)	Tempo de indentação (seg)	Microdureza HV
H ₂ 1.450 °C	94WC-6Co	1.000 gf	15 seg	1.663 ± 20HV
H ₂ 1.420 °C	90WC-10Co	1.000 gf	15 seg	1.437 ± 20HV
H ₂ 1.400 °C	85WC-15Co	1.000 gf	15 seg	1.150 ± 20HV
H ₂ 1.360 °C	80WC-20Co	1.000 gf	15 seg	1.055 ± 20HV

3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 7 mostra-se uma magnificação de 300X exibindo uma mistura homogênea do compósito WC-10Co. A Figura 8 com uma magnificação de 1500X, exibindo também a homogeneidade da mesma, onde é possível observar o cobalto adicional na mistura.

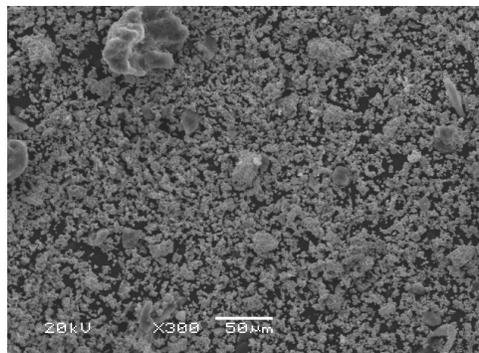


Figura7: Mistura de WC-10Co (300X).

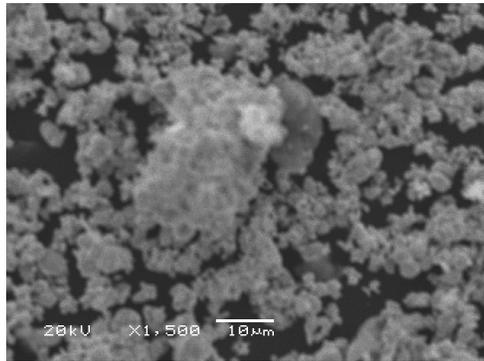


Figura 8: Mistura de WC-10Co (1.500 X).

A Figura 9 mostra uma magnificação de 300X exibindo uma mistura homogênea do WC-15Co, A Figura 10 uma magnificação de 4.000X, exibindo também a homogeneidade da mesma liga podendo observar o cobalto adicional na mistura. A Figura 11 mostra o ponto onde foi realizado o EDS e a Figura 12 mostra o resultado do EDS.

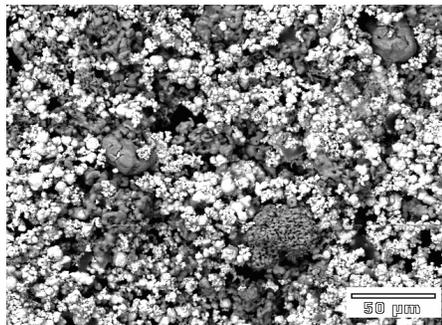


Figura 9: Mistura de WC-15Co (300X).

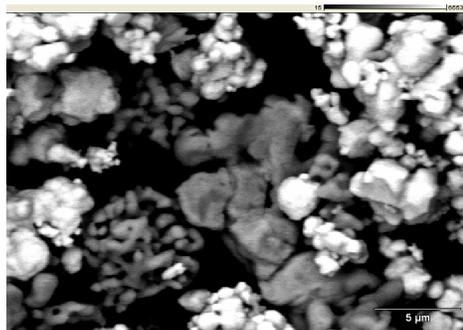


Figura 10: Mistura de WC-15Co (4000 X).

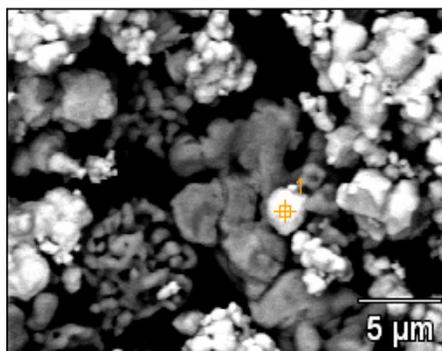


Figura 11: Mistura de WC-15Co (4000 X).

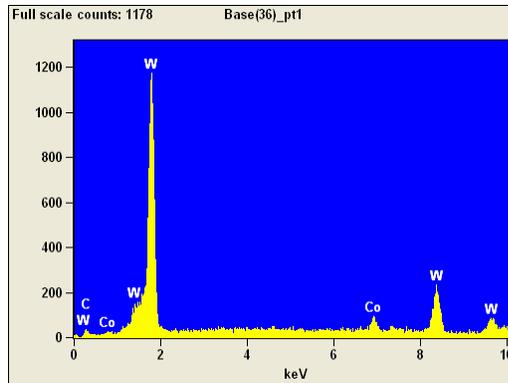


Figura 12: EDS do compósito WC-15Co.

A Figura 13 mostra uma magnificação de 300X exibindo uma mistura homogênea de WC-20Co. A Figura 14 com uma magnificação de 4000X, exibindo também a homogeneidade do mesmo compósito podendo observar o cobalto adicional na mistura.

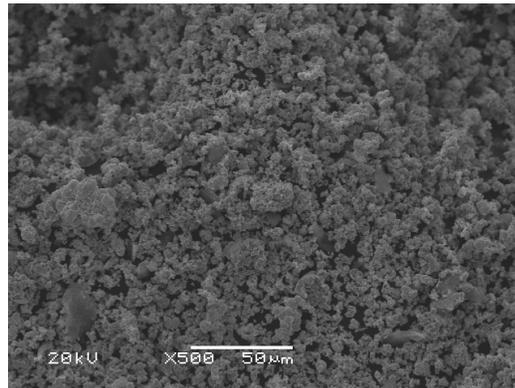


Figura 13: Mistura de WC-20Co (500 X).

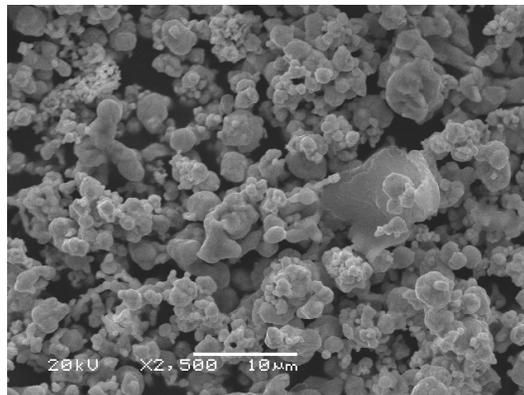


Figura 14: Mistura de WC-20Co (2500 X).

Após o processo de sinterização fez-se análise metalográfica com aumento de 3.000 X para analisar a microestrutura do compósito WC-6Co sinterizado e dos novos compósitos processados no misturador “Y”.

A Figura 15 apresenta a metalografia do compósito de WC-6Co sinterizado à 1.450°C. A Figura 16 mostra a metalografia do compósito de WC-10Co sinterizado à 1.420°C.

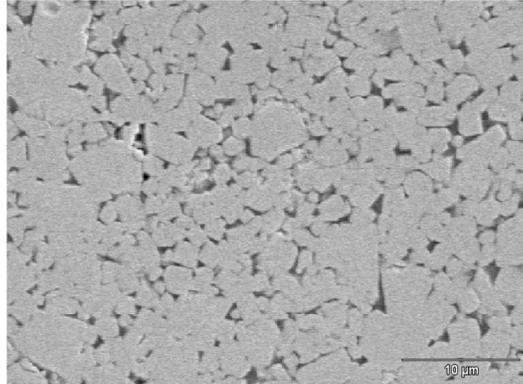


Figura 15: Microestrutura de WC-6Co (3.000 X).

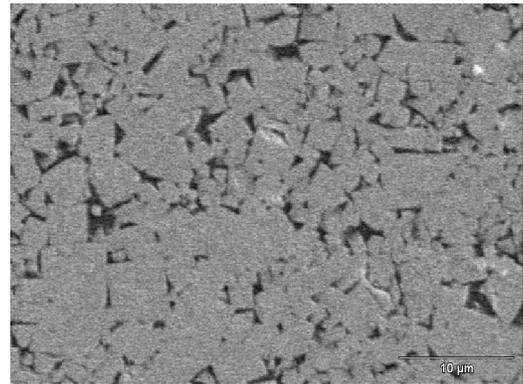


Figura 16: Microestrutura de WC-10Co (3.000 X).

A Figura 17 exhibe a metalografia do compósito de WC-15Co sinterizado à 1.400°C. A Figura 18 apresenta a metalografia do compósito de WC-20Co sinterizado à 1.360°C.

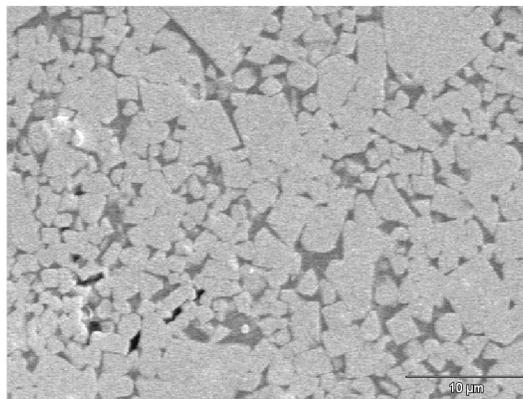


Figura 17: Microestrutura de WC-15Co (3.000 X).

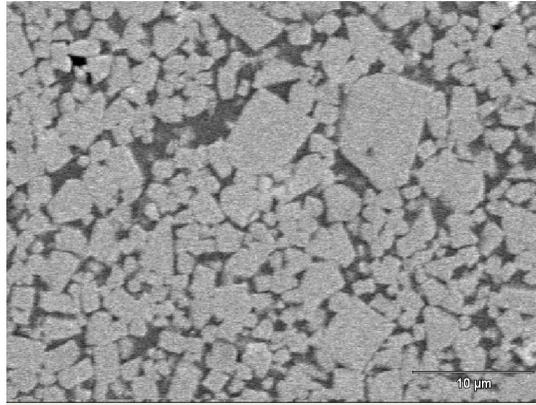


Figura 18: Microestrutura de WC-20Co (3.000 X).

4 DISCUSSÃO

Focando analisar a eficiência do balanço de massa com a adição de cobalto menor de 37 μm em um compósito de 94WC-6Co, foi obtida a densidade aparente dos compósitos processados em um misturador “Y”, no qual se observou que a densidade aparente ficou entre 2,45 g/cm^3 e 2,63 g/cm^3 .

Através da análise da mistura com o microscópio eletrônico de varredura pode-se ver a homogeneidade dos compósitos com uma boa dispersão do cobalto sobre o compósito comercial.

Após a compactação dos quatro compósitos balanceados estequiometricamente e com a mesma pressão de 200MPa, e massas próximas, obteve-se a densidade à verde que diminui gradativa e proporcionalmente com o aumento do percentual de cobalto do compósito de metal duro. A densidade à verde do compósito comercial variou entre 7,91 g/cm^3 e 8,06 g/cm^3 . A faixa de densidade do compósito com 10% de cobalto variou entre 7,31 g/cm^3 e 7,50 g/cm^3 . O compósito de WC-15Co obteve uma densidade a verde com uma faixa entre 7,13 g/cm^3 e 7,25 g/cm^3 . A densidade do compósito de WC-20Co variou entre 6,80 g/cm^3 e 7,04 g/cm^3 .

O compósito com 20 por cento de cobalto foi sinterizado na temperatura de 1360°C, e através da densidade do sinterizado e microdureza em HV, observou-se que os valores aproximam-se dos valores indicados na literatura. Para o compósito WC-15Co utilizou-se a temperatura de 1400°C, observando-se que seus valores de densidade e microdureza também se aproximam dos valores da literatura.

A temperatura de 1.420°C foi utilizada para sinterizar o compósito com 10% de Cobalto, e valores de densidade e microdureza aproximou-se dos valores da literatura. Foi observada coerência comparando os valores de densidade do sinterizado e microdureza com os da literatura, comprovando assim a eficiência do processo de obtenção do compósito por balanço de massa.

A análise metalográfica dos compósitos de metal duro mostra a distribuição homogênea dos grãos de carbeto de tungstênio sobre o cobalto, indicando eficiência no balanço de massa em função da temperatura de sinterização, validando assim a curva térmica com sua taxa de aquecimento e de resfriamento.

Um comparativo metalográfico também foi analisado, exibindo visivelmente que a adição do cobalto se distribuiu sobre as amostras durante a sinterização, mostrando claramente, que ocorreu um decréscimo gradual da quantidade de cobalto entre as Figuras 15, 16, 17 e 18. A metalografia exhibe a eficiência do processo.

5 CONCLUSÃO

A densidade do sinterizado, a microdureza e a metalografia são provas para a validação do método de obtenção de uma mistura, a partir de um compósito comercial de metal duro através do balanço de massa.

As propriedades dos compósitos de metal duro a partir de uma mistura processada, com adição de cobalto, no misturador “Y”, em uma sinterização convencional em relação aos compósitos comerciais sinterizados se mostraram equivalentes.

O custo será um fator importante para validar o processo a nível industrial, pois tendo um compósito comercial de metal duro e pó de cobalto elementar, poderá obter-se um compósito com qualquer percentual de cobalto acima do comercial, sem mencionar, a diminuição ou extinção do custo direto da moagem de alta energia em um processo industrial.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica) e a Escola de Engenharia - UFRGS, pelo uso dos laboratórios e da infra-estrutura da universidade.

Os autores agradecem também ao CNPq, CAPES, FINEP e a empresa IMER Usinagem Ind. com. LTda- Porto Alegre- RS, pelo apoio financeiro e investimento na área de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, V.; Metalurgia do pó. São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2001 4ª Ed.
- 2 KIM CHANG-SOO. Microstructural-Mechanical Property Relationships in WC-Co Composites. 2004, 214p. Ph. D Tesis. University Pittsburgh, USA.
- 3 BRITO F. I. G.; MEDEIROS K. F.; LOURENÇO J. M. Um Estudo Teórico Sobre a Sinterização na Metalurgia do Pó. Holo, Ano 23, v. 3. p. 204-211, 2007.
- 4 PETER ATKINS E LORETTA JONES; Princípios de Química, questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre, Brasil: Bookmam, 2001 cap. 6 p. 371-374
- 5 WILLIAMS COLLEGE Y RAYMOND CHANG; Química. Cuauhtémoc, México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A., 7ª Ed. 2002. Cap. 2, p. 37
- 6 DAVID HARVEY; Modern Analytic Chemistry. Boston, EUA: McGraw-Hill Companies, Inc. for manufacture and export, 2000 cap. 10 p 20-34
- 7 JAMES N. SPENCE, GEORGE M. BODNER E LYMAN H. RICKARD; Química, Estructura y Dinámica. México: Compañía Editorial Continental, 2000, cap. 2 p. 59-80
- 8 KOLASKA, H. UND WHEITH, W.; Pulvermetallurgie der Hartmetalle. Hartmetall als Konstruktionsbauteil in der Chemischen Industrie. Deutschland: FPM – Fachverband Pulvermetallurgie, 1992. Kapitel 16
- 9 ALIBERT, C.H.; Sintering Features of Cemented Carbides WC-Co Processed from Fine Powder. International Journal of Refractory Metals e Hard Materials, 19, 2000, p. 53-61.