

MOAGEM DE RESÍDUOS DE WC-CO DECORRENTES DA BORRA DE RETÍFICA PARA CARACTERIZAÇÃO POR GELCASTING

João Victor da Costa Alves; Fernando dos Santos Ortega.

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, joaovc@univap.br.

Resumo

A borra de retífica oriunda de ligas WC-Co é um resíduo industrial de alto impacto ambiental, geralmente é descartado em aterros devido à presença de metais pesados e óleo de corte. O presente estudo propõe uma alternativa de reutilização desse material por meio de moagem e reaproveitamento em formulações por gelcasting. A pesquisa avaliou a influência do tempo de moagem no tamanho de partículas e sua relação com a qualidade das peças conformadas. Foi utilizada a gelatina como agente gelificante, o que possibilita a preparação de suspensões com maior concentração de sólidos e adequada fluidez. As amostras processadas com material moído apresentaram estrutura mais homogênea, com menor porosidade e maior estabilidade, diferente daquelas obtidas a partir da borra apenas lavada. Porém, ainda foram observadas trincas e poros residuais, o que indica que ajustes na metodologia são necessários. Os resultados demonstram que o reaproveitamento da borra de WC-Co é tecnicamente viável e pode contribuir para reduzir impactos ambientais.

Palavras-chave: Borra de retífica. Gelcasting. Sustentabilidade.

Introdução

A geração de resíduos industriais representa uma das formas mais críticas de degradação ambiental, agravada pelo crescimento da produção e da competitividade, que aumenta também a quantidade de rejeitos descartados de forma inadequada, com impactos à saúde humana e ao meio ambiente (Orth et al., 2014; Zanin et al., 2004). No Brasil, esses resíduos são bastante variados — desde cinzas e óleos até metais e cerâmicas —, reforçando a necessidade de políticas de desenvolvimento sustentável que conciliem desenvolvimento econômico e preservação ambiental (Brasil, 2004; Caetano, 2009).

Entre esses resíduos, destaca-se a borra de retífica, composta por partículas finas de WC e Co, fragmentos abrasivos e óleo de corte. Classificada como perigosa devido ao seu potencial poluidor, é tradicionalmente destinada a aterros industriais, prática que implica custos e riscos ambientais. Estudos recentes, no entanto, demonstram que, após tratamentos adequados, esse material pode ser reaproveitado como matéria-prima secundária em compósitos ou em rotas de metalurgia do pó, com resultados promissores (Hankel et al., 2020; Jäger et al., 2021).

Esse resíduo está associado ao processamento de metais duros, ou cermets, produzidos majoritariamente por rotas de metalurgia do pó. O sistema WC-Co é o mais utilizado devido ao equilíbrio entre dureza, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade em serviço (Miranda et al., 2024). Considerando esse cenário, este projeto avaliou o efeito da moagem da borra de retífica sobre a concentração de sólidos em suspensões destinadas à moldagem pelo processo gelcasting. Devido a limitações no uso de monômeros no processo gelcasting de WC-Co, optou-se pelo uso de gelatina como agente gelificante (Ortega et al., 2010) para a conformação de amostras.

Metodologia

A borra de retífica de WC-Co, fornecida pela empresa BRATS, foi submetida à moagem em moinho de bolas por 10 e 24 horas, sendo comparada com a condição inicial, recebida em estado seco. A caracterização granulométrica foi realizada por meio de espalhamento de laser (Microtrac S 3500) em meio aquoso e por microscópio eletrônico de varredura para avaliar o efeito da moagem.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

No processamento por gelcasting, inicialmente foram conduzidos estudos preliminares com matérias-primas virgens, com o objetivo de validar sistemas gelificantes. Definiu-se, a partir desses resultados, o uso de gelatina como agente gelificante em substituição ao sistema baseado em monômeros. A borra de retífica foi então utilizada em duas condições distintas: apenas lavada e lavada seguida de moagem.

A suspensão foi preparada por meio da dispersão do pó em solução aquosa de gelatina a 8% em peso, adicionando-se 250 mL de PDADMAC (Cloreto de poli-dialildimetil amônio, Sigma-Aldrich) como dispersante. A mistura inicial foi feita com agitação manual e, em seguida, desaglomerada por ultrassom de ponteira (Vibra Cel VC-505, 500 W, 60% da potência, durante 3 minutos). Após a homogeneização, a suspensão foi vertida em moldes cilíndricos de alumínio anodizado posicionados sobre mesa vibratória, de modo a auxiliar na remoção de bolhas.

O processo de gelificação ocorreu após 40 minutos em refrigerador. As amostras GC1 e GC2 permaneceram 24 horas no refrigerador e mais 24 horas em estufa a 50 °C para completa secagem, enquanto a amostra GC3 foi submetida a uma secagem acelerada, permanecendo apenas 1 hora em refrigerador e sendo imediatamente colocada em estufa a 50 °C. A Tabela 1 apresenta os parâmetros usados para produzir as amostras.

Tabela 1 – Formulação da suspensão de borra de retífica à base de WC-Co para moldagem por gelcasting, com concentração de sólidos de 35% em volume.

Denominação	GC1	GC2	GC3
Fração volumétrica	0,26	0,29	0,35
Massa de Borra Lavada (g)	101,4	0	0
Massa de Borra Lavada e Moída (g)	0	103,9	136,5
Massa de solução de gelatina* (g)	19,5	19,5	19,5
Dispersante – PDADMAC (ml)	250	250	250

* A solução de gelatina foi preparada com concentração de 8% em peso, solubilizada em água destilada sob agitação, a 40°C.

Fonte: O Autor

Em seguida, todas as amostras foram sinterizadas em forno industrial a vácuo, a 1380 °C por 50 minutos. Posteriormente, foi realizada análise por microscopia eletrônica de varredura em diferentes ampliações (1.000x, 5.000x e 10.000x).

Resultados

A moagem em moinho de bolas promoveu uma redução significativa no tamanho de partículas, com maior eficiência observada nas primeiras 10 horas de processamento, em que o diâmetro médio reduziu de 35 µm para 7 µm, atingindo 5 µm após 24 horas, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição de tamanhos de partículas.

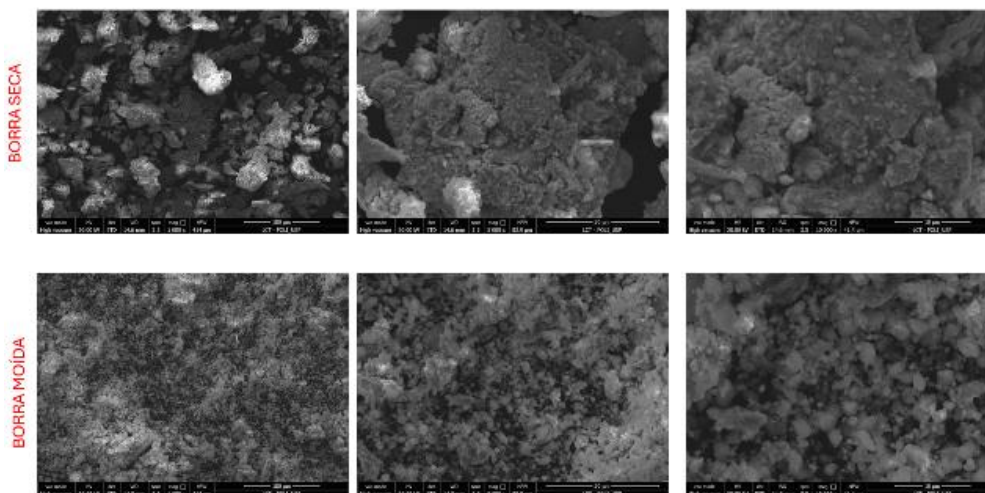
	Diâmetros (µm)		
BORRA	d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀
Como recebida	14	35	135
10h	3	7	26
24h	2	5	22

Fonte: O Autor

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

As micrografias obtidas evidenciaram claramente a diminuição no tamanho das partículas, como mostra a Figura 1.

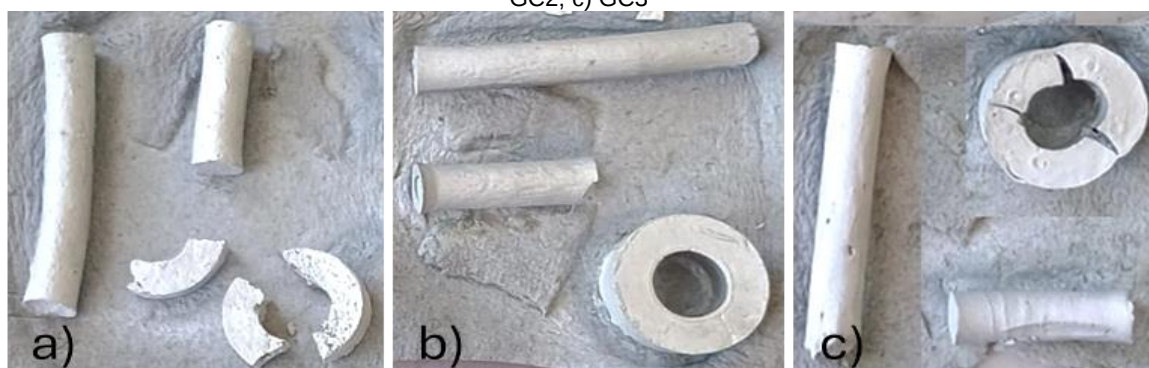
Figura 1 – Micrografias obtidas em microscópio eletrônico de borra como recebida (seca) e após moagem em moinho de bolas por 24 horas.



Fonte: O Autor

Com o material moído, foi possível aumentar a concentração de sólidos nas suspensões, passando de 26% para até 35% em volume, mantendo fluidez suficiente para a moldagem. A Figura 2 mostra imagens das amostras após a sinterização, onde nota-se que a amostra GC1, produzida com a borra apenas lavada, sofreu deformações e fraturas. Já as amostras GC2 e GC3, preparadas com o material lavado e moído, não apresentaram deformações. Deve-se destacar que as trincas observadas na amostra GC3 formaram-se durante a secagem, que foi mais acelerada, e não durante a sinterização, o que mostra a necessidade de se controlar a taxa de secagem para evitar tensões mecânicas excessivas nesta etapa do processamento.

Figura 2 – Amostras de WC-Co imediatamente após serem removidas do forno de sinterização: a) GC1; b) GC2; c) GC3

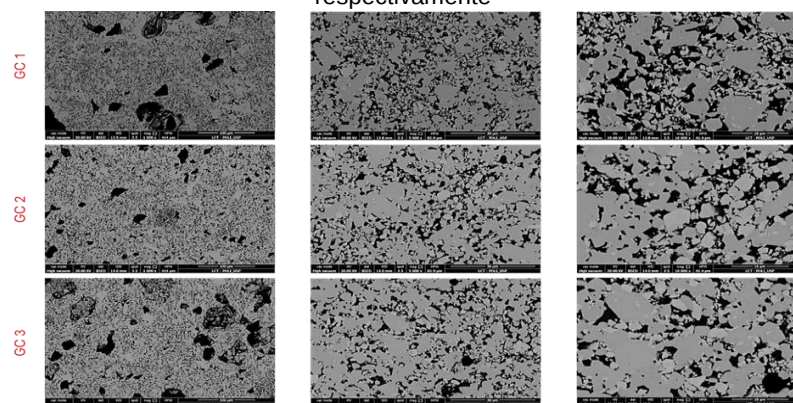


Fonte: O Autor

As análises em microscópio eletrônico (Figura 3) mostraram que todas as amostras apresentaram certa porosidade, atribuída tanto à retenção de bolhas durante o processamento quanto à presença de poros intergranulares. No entanto, verificou-se que as amostras obtidas a partir do material moído (GC2 e GC3) apresentaram microestrutura mais homogênea e menor porosidade em comparação à amostra GC1.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 3 – Imagens obtidas das amostras GC1, GC2 e GC3, com aumentos de 1.000, 5.000 e de 10.000 vezes, respectivamente



Fonte: O Autor

Discussão

Os resultados confirmam a eficiência da moagem em reduzir o tamanho médio das partículas e em melhorar as condições de processamento da borra de retífica. O uso da gelatina como agente gelificante mostrou-se adequado ao processamento por gelcasting, possibilitando a produção de peças com melhor integridade estrutural.

A deformação observada na amostra GC1 evidencia a importância da moagem no processamento da borra, garantindo maior estabilidade dimensional. Já o surgimento de trincas em GC3 demonstra que o controle adequado da secagem é fundamental, sobretudo em peças de geometria mais complexa, onde gradientes de umidade podem resultar em tensões internas e formação de defeitos.

A análise estrutural também indicou que a moagem favorece a obtenção de partículas mais homogêneas, com redução significativa da porosidade. Apesar dos avanços obtidos, ainda há necessidade de ajustes no processamento, de forma a reduzir a porosidade e, consequentemente, aprimorar as propriedades mecânicas do material final.

Conclusão

O estudo confirmou a potencialidade do uso da borra de retífica de MC-Co como matéria-prima alternativa. Para isso, a submissão das partículas no moinho de bolas é fundamental para a melhoria do processamento via gelcasting, proporcionando partículas mais finas, maior concentração de sólidos em suspensão e peças com microestruturas mais homogêneas.

O uso da gelatina como agente gelificante mostrou-se adequado e superior ao sistema de monômeros, no caso de peças de WC-Co, garantindo boa integridade das amostras. Entretanto, ainda são necessários ajustes no processo, como o aperfeiçoamento da etapa de secagem e da sinterização, de modo a reduzir a porosidade intergranular e otimizar as propriedades finais do material.

Assim, o estudo indica que a valorização da borra de retífica por rotas de processamento cerâmico é viável, mas demanda refinamento das etapas de conformação e tratamento térmico.

Referências

HANKEL, J. et al. Development of a recycling strategy for grinding sludge using supersolidus liquid phase sintering. *Journal of Cleaner Production*, v. 263, 121501, 2020.

JÄGER, S. **Potential of the recycling of grinding sludge by various powder metallurgical processes.** *Procedia CIRP*, v. 104, p. 893–899, 2021.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

MIRANDA, F. et al. **Metal-duro a base de NbC versus metal-duro a base de WC: microestrutura, dureza e resistência à ruptura por flexão.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12., 2024, Belém. *Anais...* Rio de Janeiro: ABCM, 2024

Maria, A. Brasil. et al. **Equilíbrio Ambiental e resíduos na sociedade moderna.** São Paulo. Ed. FAARTE. 2004.

CAETANO, N. Análise da viabilidade econômico-financeira de uma Unidade de resíduos industriais não perigosos em Portugal. **ISCTE Business School – Instituto Universitário de Lisboa.** Dissertação – Departamento de Finanças - Mestrado em Gestão, 2009.

DONNINI, M.; Sandro; ZANIN, Maria. Resíduos Plásticos e Reciclagem: Aspectos gerais e tecnologia. São Carlos: **Editora da Universidade Federal de São Carlos**, 2004. p 63.

Baldin, N.; Orth, C. M.; Zanotelli, C. T. (2014). A geração de resíduos sólidos em um processo produtivo de uma indústria automobilística: uma contribuição para a redução. **Gestão & Produção**, 21(2), 447–460.

Nobrega, B. N.; Oliveira, R. L. S.; Ortega F. S.; Plínio M. C. **Gelcasting of Stainless Steel Powder: An Alternative to Injection Molding.** MSF 2010;660–661:194–9.

Agradecimentos

O presente trabalho é financiado pela empresa BRATS, Projeto nº. 2022/06201-7.