



RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE DIFERENTES MATERIAIS FABRICADOS A PARTIR DE PÓ DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

Moisés Luiz Parucker¹

Cesar Edil da Costa²

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Centro de Ciências Tecnológicas – CCT/FEJ

Joinville, SC – Brasil

(1) dem6mlp@dcc.fej.udesc.br, (2) dem2cec@dcc.fej.udesc.br

Resumo. Este artigo apresenta o estudo tribológico através do ensaio pin-on-disc de materiais preparados com diferentes conteúdos de pó de cavaco de ferro fundido reciclado. A obtenção de um aço, foi por compactação a 700 MPa e sinterização a 1160°C/1hora. Os ensaios são realizados em três etapas. Na primeira etapa, o pó de cavaco utilizado apresenta conteúdo de 3,5% de carbono total e na segunda etapa, o pó apresenta 1,2%. Os resultados mostram que diferentes materiais da segunda etapa apresentam propriedades muito superiores em relação a primeira etapa, em que, o elevado conteúdo de carbono total, produz durante a compactação corpos de prova com muitas fissuras devido ao excesso de grafita livre, provocando a lubrificação entre as partículas de ferro e conduzindo a uma heterogeneidade estrutural. Observou-se porém, que menores pressões de compactação conduzem a melhor compactabilidade. Seguiu-se assim, em uma terceira etapa a avaliação ao desgaste dos materiais compactados a 250 MPa. Os resultados de resistência apresentaram-se surpreendentes, onde as amostras com crescente conteúdo de pó de cavaco conduzem aos melhores resultados em resistência ao desgaste e homogeneidade estrutural, além de porosidade interconectada.

Palavras-chave: Pó de cavaco, Aços diluídos, Resistência ao desgaste.

1. INTRODUÇÃO

Grandes quantidades de cavacos de usinagem são geradas anualmente pelas indústrias metal-mecânica no mundo inteiro, tanto de materiais ferrosos como de ligas não ferrosas.

Os cavacos de usinagem de aços e ferros fundidos são os mais importantes quanto ao volume e tonelagem envolvidos, sendo interessante sua reutilização econômica por outros métodos diferentes da simples refusão no forno, onde se tem um baixo rendimento e problemas de poluição ambiental devido à queima do óleo lubrificante que impregna as partículas de cavacos.

Um dos métodos promissores é a técnica da metalurgia do pó em que através de moagem dos cavacos em moinhos de bolas/martelo e ou moinhos de alta energia, consegue-se quebrar e romper o cavaco obtendo-se uma eficiente cominuição desse material. O cavaco de ferro

fundido cinzento em particular, é um dos materiais que melhor se adapta à via da metalurgia do pó para ser recuperado e reutilizado na fabricação de peças e componentes sinterizados. A obtenção de pós finos, a partir de cavacos de ferro fundido cinzento, é favorecida pela fragilidade das partículas de cavaco, que rompem com facilidade; torna-se necessário neste caso, a eliminação ou redução de excesso de grafita para melhorar as propriedades mecânicas do material (Nakagawa, 1985).

Os primeiros trabalhos realizados com pós de cavacos pela técnica da metalurgia do pó, evidenciou a grande dificuldade no processo de compactação do pó devido a grande quantidade de grafite livre no material que acabava por exceder a lubrificação durante consolidação dos pós. Com compactação e sinterização seguidos de forjamento, observou-se uma melhora na consolidação e nas propriedades dos produtos compactados, inclusive após tratamentos térmicos (Brown, 1972).

Devido a grande dificuldade encontrada para compactar o pó, foi necessário eliminar parte do carbono total presente (3,5%), através de métodos de separação durante moagem, tratamentos térmicos e hidrociclone, obtendo-se assim um pó com carbono total de no máximo 2,0%. (Nakagawa, 1981; Takeda, 1981; Zapata, 1995).

Este trabalho apresenta portanto, um estudo da resistência ao desgaste de aços diluídos com pó de cavaco processados pela técnica da metalurgia do pó.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho se utilizou pós de cavacos provenientes de moagem em moinho de bolas com teor de 3,5% de carbono total e pós descarburados (tratamento térmico com Fe_2O_3 /850 °C/1hora) com teor de 1,2% de carbono total. A tabela 1 apresenta as características físico-química dos pós utilizados.

Estes pós foram misturados (numa primeira etapa com pó de cavaco moido e numa segunda etapa com pó moido/descarburado) com ferro atomizado puro para formar uma liga de aço por diluição em porcentagens de 30, 50, 70 e 100% de pó de cavaco e compactados unidirecionalmente a 250 e 700 MPa. Durante a terceira etapa, se fabricou também uma composição de aço para mancal (base ferro-carbono) para utilizarmos como comparativos aos resultados expostos e com objetivo futuro de se fabricar mancais devido a baixa pressão de compactação aplicada e às características dos produtos obtidos. A tabela 2 apresenta a composição e conteúdo final de carbono total das misturas.

Os materiais foram sinterizados a 1160 °C por um tempo de 1 hora em atmosfera de gás 92% N_2 -8% H_2 e a caracterização mecânica foi realizada pela avaliação da dureza Vickers e do comportamento tribológico através do ensaio pin-on-disc (ASTM G 99).

Os ensaios de desgaste se realizaram segundo as condições: distância percorrida pelo pino, 1000 m; velocidade linear, 0,2 m/s; umidade do ar, < 30%, utilizando uma bola de aço de cromo martensítico (diâmetro: 6 mm e dureza: 49 HRC), como contra material “pino”, sem lubrificação e com uma carga aplicada de 5 N.

Para encontrar um critério de avaliação dos resultados, o desgaste sofrido pelos materiais foi avaliado em função da perda em massa a partir da qual se obtém a constante de desgaste segundo indica a equação 1, pela determinação de 3 repetições consecutivas:

$$k(\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}) = \frac{\text{perda em massa}(g)}{\text{densidade}(g / \text{cm}^3) \cdot \text{carga}(N) \cdot \text{distância}(m)} \quad (1)$$

Após os ensaios de desgaste, as pistas desgastadas foram estudadas através de microscopia eletrônica de varredura, com o objetivo de observar e analisar os possíveis tipos de desgaste, tais como abrasivo, adesivo e possível oxidação.

Tabela 1 - Pós de cavacos de usinagem (ferro fundido cinzento lamelar).

Pó de cavaco base			
Composição química		Tamanho	
Elemento químico	Encontrado (%)	Distribuição granulométrica Mesh	Porcentagem (%)
C	3,45	+140	0,68
Si	2,08	+200	13,55
Mn	0,58	+230	29,92
Cr	0,08	-230	54,47
S	0,12		
P	0,035		
Densidade aparente (g/cm ³)		1,6	
Densidade batida (g/cm ³)		2,96	
Compressibilidade (700 MPa)		5,53	
Pó de cavaco descarburado			
C	1,2	+140/-230	100

Tabela 2 - Classificação dos aços diluídos.

ETAPA 1: pó de cavaco (3,5% C total)					ETAPA 2 e 3: pó descarburado (1,2% C total)				
AMOSTRAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA(%)			DILUIÇÕES	AMOSTRAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA(%)			DILUIÇÕES
	Fe	Pó de cavaco	Cu	C total		Fe	Pó de cavaco	Cu	C total
M1	100	-	-	-	M2R	70	30	-	0,36
M2	70	30	-	1,05	M3R	50	50	-	0,60
M3	50	50	-	1,75	M4R	30	70	-	0,84
M4	30	70	-	2,40	M5R	-	100	-	1,20
M5	-	100	-	3,50	M6R	50	50	3,5	0,62
M6	50	50	3,5	1,80	M7R	30	70	3,5	0,85
M7	50	50	5,0	1,80	M8R	-	100	3,5	1,24
M8	50	50	10,0	1,90	M2R	70	30	-	0,36

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de desgaste

Etapa 1 Misturas com pó de cavaco com 3,5% carbono total.

Este estudo revela como resultado para os distintos materiais, uma série de valores que se mostram na figura 1.

O primeiro aspecto que se pode destacar e mais importante, é o forte aumento que se produz no desgaste destes materiais com respeito ao aumento da quantidade de pó de cavaco adicionado às misturas. É importante destacar uma melhora substancial com a presença de 3,5% de cobre da mistura M6 (50/50%) e que é pior na presença de 5,0% de cobre (M7), devido ao cobre livre presente na estrutura. Na micrografia da figura 2, pode-se observar por microscopia eletrônica de varredura, a pista de desgaste de um material com 50% de pó de cavaco (M3).

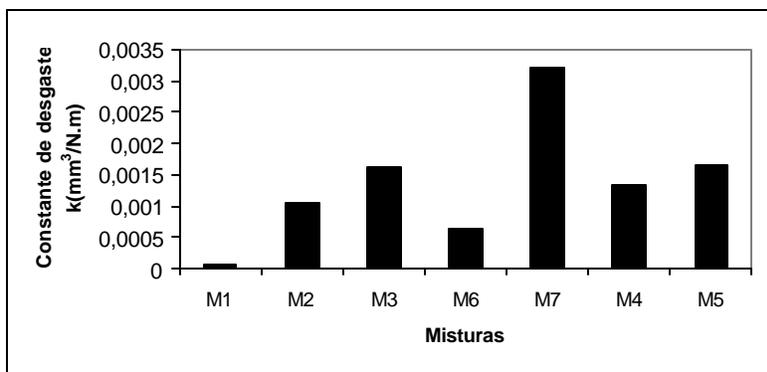


Figura 1- Constante de desgaste dos materiais estudados.

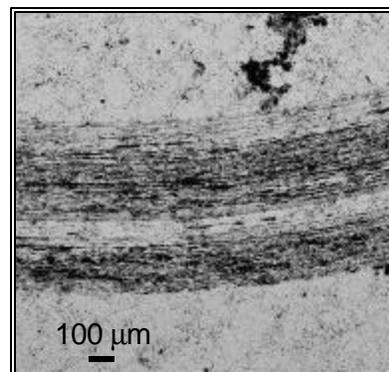


Figura 2- Pista de desgaste de amostra M3 (MEV).

Pode-se observar na figura 2, a considerável perda de material, o que pelas pistas de desgaste indica que houve arranque de material em misturas sem a presença de cobre, além de forte oxidação sofrida durante os ensaios.

O endurecimento do material provocado pela presença do conteúdo crescente de carbono nas misturas, provoca uma maior fragilidade do material e em consequência, ocorre o arranque pela ação do pino durante o ensaio. Se analisarmos as misturas contendo cobre, observa-se que existe um arranque de material menor, principalmente com amostras contendo 3,5% de cobre, provocado pela deformação que se produz neste pela ação do pino durante o ensaio, que diferentemente do caso anterior, desliza sobre a superfície, deformando-a. Deve-se este fato também pela melhor homogeneidade estrutural provocado pelo cobre que além de estar totalmente dissolvido no ferro, promoveu uma melhor sinterização por formação de fase líquida e conseqüentemente maior densificação dos materiais com o fechamento da porosidade.

É importante destacar também, que os óxidos formados durante o ensaio eram novamente incorporados no material pela ação do pino e da carga aplicada, provocando o aparecimento de um terceiro corpo que também influenciou os resultados de desgaste das diferentes misturas.

Como os resultados dos ensaios não foram satisfatórios pela baixa compactabilidade devido excesso de grafita livre presente nas misturas, seguiu-se na segunda etapa a realização dos mesmos ensaios, porém utilizando misturas com pós de cavacos descarburados.

Etapa 2 - Misturas com pó de cavaco com 1,2% carbono total

Da mesma forma que na etapa anterior, se realizou o estudo tribológico cujos resultados são indicados na figura 3.

O primeiro aspecto que podemos destacar, é a forte redução que se produz no desgaste de materiais com a presença de cobre (M6R, M7R e M8R), verificado também durante a primeira etapa. É importante observar a melhora substancial que apresentaram as diferentes misturas em forma de constante de desgaste, a qual alcançou reduções de 50%, comparadas às amostras submetidas às mesmas condições de desgaste de primeira etapa, devido principalmente à descarburagem do pó de cavaco.

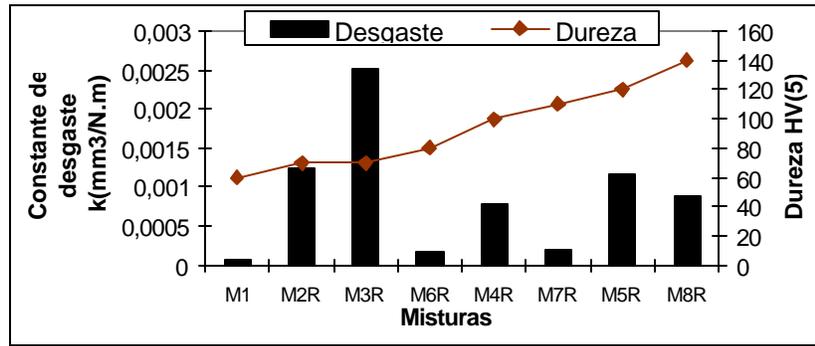


Figura 3- Constante de desgaste dos materiais estudados.

Avaliando-se a figura 3, observa-se que a mistura M6R apresentou um melhor desgaste e que sua mesma composição, mas sem a presença de cobre (M3R), apresentou resultados ao desgaste mais elevado em relação às demais amostras. Este fato está relacionado à forte oxidação sofrida nas amostras submetidas ao desgaste, e devido a um terceiro corpo, a partir de compostos complexos de ferro-silicatos presentes nas porosidades destes materiais, provenientes da descarburização dos pós com Fe₂O₃, que poderiam estar atuando como um corpo abrasivo durante o ensaio e diminuindo a resistência ao desgaste. Esta evidência é bem pronunciada pelo desgaste sofrido pela bola, para amostras com conteúdo superior a 50% de pó de cavaco adicionado às misturas. Desta forma, em M3R, por apresentar um conteúdo de 50% de ferro puro, houve um desgaste mais acentuado da amostra (disco) e em amostras com porcentagens superiores a 50% de pó de cavaco, houve um desgaste bem evidente na bola (pino) e que revela a maior presença destes abrasivos complexos nestas amostras e influenciados também pela maior dureza em conteúdo crescente de pó reciclado adicionado às misturas.

Assim, o desgaste destas amostras foi maior quando associadas a presença de maior conteúdo de pó de ferro puro, como no caso de M2R e M3R. Em M1 se trata de um material comparativo totalmente puro e que apresenta melhor resistência ao desgaste por não apresentar a presença de um corpo abrasivo atuando durante o ensaio.

A adição de cobre (amostras M6R, M7R e M8R) melhorou a resistência ao desgaste devido ao cobre provocar uma excelente sinterabilidade e conduzir a homogeneidade estrutural das amostras, mas que é pouco menos pronunciado em M8R, devido a baixa compressibilidade dos pós que afeta as características citadas.

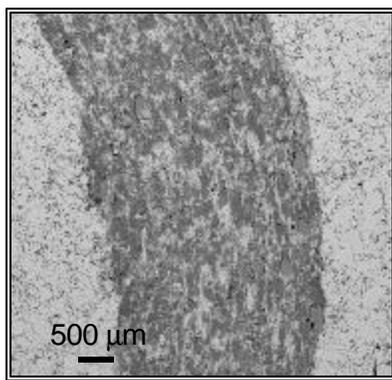


Figura 4–Pista de desgaste da amostra M3R

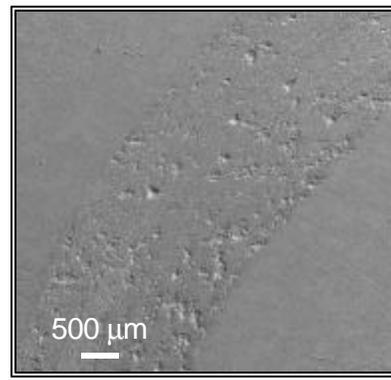


Figura 5– Pista de desgaste da amostra M6R.

A figura 4 apresenta com detalhe a pista de desgaste da amostra com 50% em conteúdo de pó de cavaco, onde observa-se uma perda de material por arranque bem homogênea. A presença de cobre provocou uma homogeneidade da estrutura e uma melhora nas características do sinterizado, minimizando o arranque de material durante o ensaio e provocando desgaste mais homogêneo (figura 5).

Se considerarmos a amostra M5R (100% pó de cavaco), observamos uma perda e arranque de material bem acentuado e heterogêneo. Esta evidência está relacionado a má compressibilidade que o material apresenta nestas condições devido a formação de pequenas trincas na amostra. A figura 6 mostra a pista de desgaste do material.

A adição de cobre promoveu melhora substancial da homogeneidade estrutural. A figura 7 apresenta uma pista de desgaste bem homogênea devido a estes fatores.

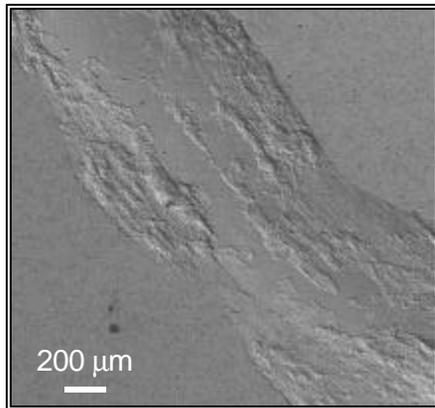


Figura 6– Pista de desgaste da amostra M5R.

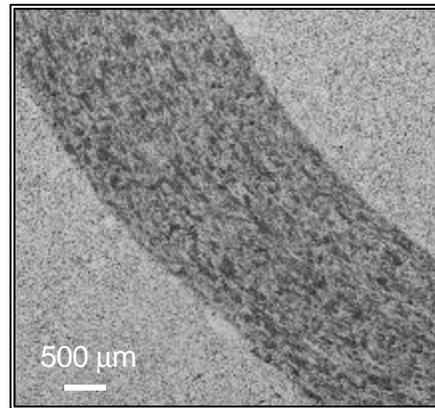


Figura 7– Pista desgaste da amostra M8R.

Etapa 3 - Misturas com pó de cavaco com 1,2% carbono total

Seguiu-se então, a uma terceira etapa aplicando pressões de compactação menores (250 MPa), para consolidação das misturas onde se verificou a formação de corpos de prova com boa resistência a verde e sem fissurações. Os resultados do ensaio de desgaste são apresentados na figura 8.

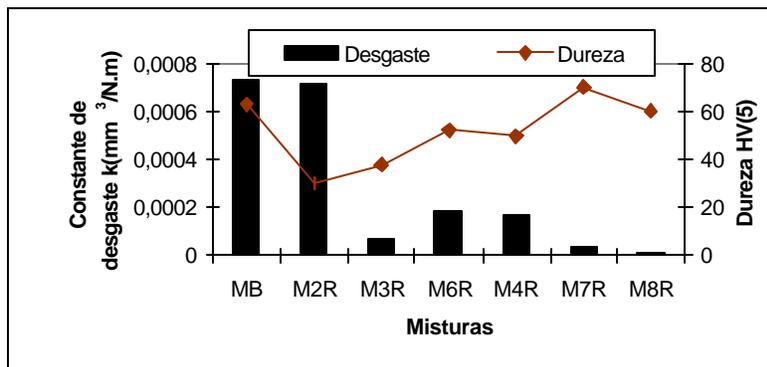


Figura 5– Pista de desgaste da amostra M6R.

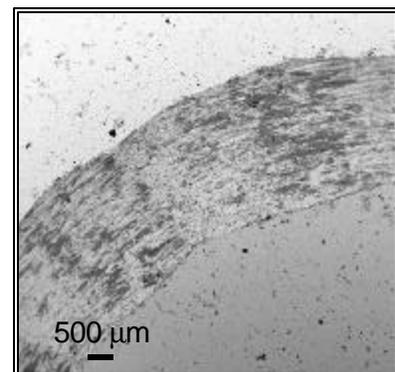


Figura 9- Pista de desgaste do material base MB.

Do ponto de vista do comportamento ao desgaste, uma queda acentuada para amostras com conteúdo crescente do pó de cavaco em relação ao material padrão-mancal. A perda de

material em MB foi muito superior ao M8R que apresenta matéria-prima totalmente reciclada. Este fato é comprovado pelo aumento da dureza e da homogeneidade estrutural provocado pela baixa pressão de compactação aplicada em amostras com conteúdo crescente de pó de cavaco.

Desta forma, o aumento da quantidade de porosidade para as amostras com crescente conteúdo de pó de cavaco evidenciada pela baixa densidade relativa, conduziu a uma maior porosidade distribuída que reteve as finas partículas abrasivas dos compostos de ferro-silicatos e que não voltaram a se incorporar na pista de desgaste durante o ensaio e conseqüentemente não atuando como terceiro corpo, mas atuando como um reforço ao desgaste.

Na estrutura (figura 9) do mancal base, pode-se observar que existe uma distribuição heterogênea de porosidades para uma densidade relativa de 75%.

Observando a figura 10, amostra M8R, verifica-se uma distribuição muito homogênea de porosidade como evidenciado nas etapas anteriores e é visível a presença dos compostos abrasivos de ferro-silicatos nas porosidades do material (figura b). A pista de desgaste mostra que praticamente não existe desgaste, embora tenha a mesma dureza e composição química do mancal base e a se considerar ainda que há a presença de muita porosidade interligada, o que é evidente pela densidade relativa de 60%.

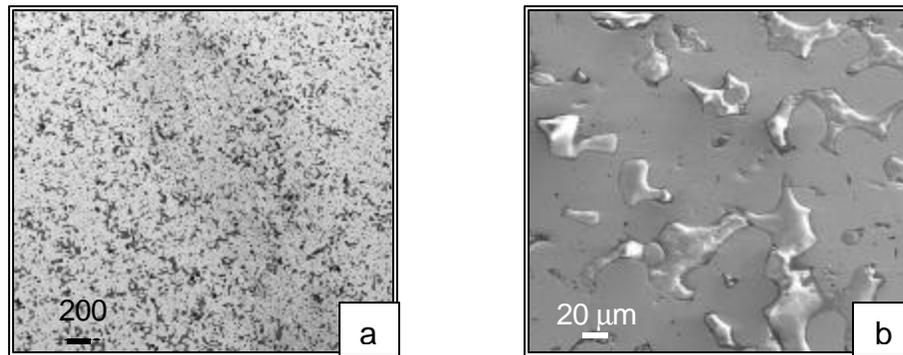


Figura 10- Características do material M8R: a) Pista de desgaste e b) Compostos de ferro-silicatos na porosidade.

4. CONCLUSÃO

- A presença de excesso de grafita livre no pó dificulta a compressibilidade e sinterabilidade dos materiais. A redução do conteúdo total de carbono de 3,5 à 1,2% melhora a compressibilidade e o processo de redução adotado se mostra eficiente para os níveis de redução sugeridos.
- O processo de consolidação do pó em diferentes misturas demonstra ser eficaz para este tipo de material quando o pó se apresenta descarburado e ou diluído com ferro puro e principalmente quando a compactação é realizada à pressões mais baixas, devido as características físicas do pó de partida, eliminando assim as numerosas dificuldades associadas a esta e fazendo-se viável para sua utilização industrial.
- A descarburagem provocou uma melhora na compactabilidade e a sinterização conduziu a materiais com dureza mais baixas e com maior resistência ao desgaste em relação à primeira etapa. A amostra M6R (50/50% pó de cavaco + 3,5% cobre) apresentou a melhor resistência ao desgaste ($k = 0,00016 \text{ mm}^3/\text{N.m}$), contudo, as demais amostras com conteúdo crescente de pó de cavaco na presença de cobre em relação à amostra M6R, também apresentaram valores baixos de desgaste.

- Em vista aos resultados expostos, a otimização das propriedades se produz com os materiais obtidos na terceira etapa. Nesta última se alcançam conjuntamente os melhores resultados. Para otimização do processo, se verificou necessário utilizar pressão de compactação menor (250 MPa), que melhora a compactabilidade, porém diminui a densidade relativa (maior porosidade), conduzindo à materiais sinterizados com estruturas homogêneas. A homogeneidade estrutural e o aumento da resistência ao desgaste dos materiais com crescente conteúdo de pó de cavaco é superior, como no caso M8R onde praticamente não ocorreu desgaste. A amostra M8R com composição de mancal base ferro apresenta-se como ideal pelas ótimas propriedades mecânicas, porosidade interligada e homogeneidade alcançadas, além de se produzir um material com cem por cento de matéria-prima reciclada.

REFERÊNCIAS

- Brown, G. T., 1972, On the gray cast iron powder for making low-cost P/M forging. Progress in Powder Metallurgy, v. 28, MPIF Princeton, NY, p. 243-258.
- Hanawa, K.; Akechi, K.; Hara, Z.; Nakagawa, T., 1980, Transaction of Japan Institut of Metals, v.21, p. 765-772.
- Nakagawa, T.; Dai, F. S., 1981, Sintering and Forging of Decarbonized Cast Iron Powder. Modern Developments in Powder Metallurgy, v. 12, p. 723-743.
- Nakagawa, T.; Dai, F. S.; Hanawa, K., 1985, Powder Forging from Casting Iron Cylinder Block Machining Swarf. Metal Powder Report, p. 79-83.
- Standart Test Method for: Wear testing with pin-on-disc apparatus.
- Takeda, Y.; Kuroishi, N. L.; Noji, S.; Hara, A., 1981, Process and Properties of Newly Developed Pulverized Swarf Forging. Modern Developments in Powder Metallurgy, v. 12, p. 745-755.
- Zapata, W. C.; DA Costa, C. E.; Torralba, J. M.; Geisler, L., 1995, Reciclagem de Cavacos de usinagem por Metalurgia do Pó. Parte I. 50°. Congresso ABM, São Paulo, p. 431-448.

WEAR RESISTANCE OF DIFFERENT MATERIALS MANUFACTURED FROM CAST IRON SWARF POWDERS

Abstract. *This paper presents a tribologic study through the pin-on-disc test of materials prepared with different contents of recycled casting iron swarf. The attainment of a steel, was for compacting at 700 MPa and sintering at 1160 °C/1 hour. The tests are carried through in three stages. In the first stage, the powder swarf used presents content of 3.5% of total carbon and in the second stage, the powder presents 1.2%. The results show that different materials of the second stage present very upper properties in relation to the first stage, where, the raised content of total carbon, produce during the compacting test specimen with many cracks due to the free excess of graphite, provoking the lubrication between iron particles leading to a structural heterogeneity. However it was observed, that lesser pressures of compacting lead the best compactability. It was followed thus, in a third stage the evaluation wear resistance of the compacted materials at 250 MPa. The resistance had presented surprising results where the samples with increasing cast iron swarf powder content lead to the best ones resulted, in wear resistance and structural homogeneity, beyond interconnected porosity.*

Keywords: *recycling, swarf powder, steel, wear resistance.*