



# Microabrasão de ferros fundidos de alta resistência

## *MICRO-ABRASION OF HIGH RESISTANCE CAST IRON*

Maria Angélica de Miranda\*, Giuseppe Pintaúde<sup>†</sup>

### RESUMO

Para salvar peso em motores à combustão interna (MCI), novas famílias de ferros fundidos mais resistentes estão sendo projetadas. Considerando que nesse sistema há a presença de particulados e que estes contribuem para o desgaste abrasivo nas paredes dos cilindros, o presente trabalho tem como objetivo a comparação do desempenho tribológico de duas classes de ferro fundido vermicular, sendo elas a GJV 450 e a GJV 500, ambas para emprego em componentes de MCI. Para isso, foram utilizadas amostras polidas em ensaios de microabrasão por esfera rotativa livre, empregando uma solução diamantada de tamanho médio menor que 0.1 micrometro como material abrasivo para determinação do coeficiente de desgaste (k). Os ensaios foram realizados no equipamento Calotest (marca registrada), com uma rotação de 300rpm e tempo de ensaio de 900 segundos. Os dados obtidos foram analisados através de um teste de hipóteses e mostraram que, estatisticamente, ambos os materiais apresentaram resistência à microabrasão similar.

**Palavras-chave:** desgaste abrasivo, ferro fundido vermicular, motores à combustão interna

### ABSTRACT

Saving weight at internal combustion engines, new families of more resistant cast iron have been developed. Considering the presence of particulates in this system and their contribution to abrasive wear on the cylinder walls, the present work aims to compare the tribological performance of two grades of compacted graphite iron, GJV450 and GJV500, both for use in internal combustion engine components. Polished samples were used in micro-abrasion tests by free ball, using a diamond solution of average size smaller than 0.1 micrometers as an abrasive material to determine the wear coefficient (k). The tests were carried out in a Calotest equipment (registered patent) with a rotation of 300rpm and testing time of 900 seconds. The data obtained was analyzed through a hypothesis test and they showed that, statistically, both materials presented similar microabrasion resistance.

**Keywords:** abrasive wear, vermicular cast iron, internal combustion engine

## 1 INTRODUÇÃO

Motores à combustão interna (MCI) ainda estão entre os mais utilizados na área automotiva. Entretanto, o desempenho desses é afetado pelo desgaste sofrido devido à queima incompleta dos combustíveis, o que pode afetar a sua vida útil, o seu rendimento, o consumo de lubrificante, entre outros.

Um dos fatores que é conhecido por contribuir para o aumento da severidade do desgaste entre os componentes em movimento relativo em um MCI é a presença de materiais particulados que podem se acumular no filtro. Tanto a fuligem (“soot”) quanto as cinzas (“ash”) fazem parte desses particulados. As cinzas são materiais compostos basicamente por elementos metálicos que não entram em combustão e levam longos períodos para serem formados. Por sua vez, a fuligem é resultante de combustão incompleta do

\*Engenharia Mecatrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [mmiranda@alunos.utfpr.edu.br](mailto:mmiranda@alunos.utfpr.edu.br)

<sup>†</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ecoville (Curitiba); [pintaude@utfpr.edu.br](mailto:pintaude@utfpr.edu.br)



combustível, sendo composta por carbono e hidrocarbonetos provenientes do combustível e do óleo do motor (SAPPOK e WONG, 2007). Estudos mostram que as partículas de fuligem podem interagir de diferentes formas com os aditivos presentes no óleo lubrificante, alterando as características tribológicas do sistema, porém ainda não existe um consenso entre os mecanismos de desgaste e essa interação (KONTOU et al., 2018).

Segundo a norma DIN 50320 (1979-12), o desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido ação mecânica, e pode ocorrer tanto pelas reações químicas envolvidas, quanto pela abrasão de micropartículas, como as cinzas e a fuligem, nas paredes dos pistões.

Dentre os materiais comumente utilizados para blocos de MCI, o ferro fundido vermicular apresenta características superiores ao ferro cinzento, possibilitando redução de massa do bloco, de consumo de combustível e de emissões de poluentes do motor. Porém, a quantidade de estudos a respeito do ferro fundido vermicular ainda é escassa, pois mesmo que tenha sido observado pela primeira vez em 1948, somente próximo dos anos 2000 é que houve desenvolvimento tecnológico suficiente para a sua produção em série (DAWSON, 2009).

As classes mais resistentes de ferro vermicular segundo a norma ISO 16112 (2006) são a GJV450 e a GJV500. Esses materiais vêm sendo estudados recentemente no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR-Curitiba, utilizando-se diversos níveis de severidade de ensaio, visando ampliar o conhecimento a respeito da relação entre microestrutura e comportamento tribológico dessas ligas (VALE, 2016; WRITZL, 2018; WOLLMANN, 2021).

Nesse cenário, o presente trabalho visa analisar e comparar o desgaste microabrasivo de ferros fundidos vermiculares de alta resistência (classes GJV450 e GJV500), por meio do ensaio de micro abrasão por esfera rotativa, ou seja, dentre as classes analisadas, qual delas pode ter seu desempenho considerado superior quando submetidos a sistemas abrasivos?

## 2 MÉTODO

### 2.1 Corpo de prova e lama abrasiva

As amostras utilizadas no experimento foram ferros fundidos vermiculares de alta resistência das classes GJV450 e GJV500, cujos valores de algumas propriedades típicas estão dispostos na Tab. 1, segundo a norma ISO16112/2006 (GUESSER, 2009). Os corpos de prova foram lixados conforme a seguinte ordem de grãos: 220, 360 e 400, tendo seguido um processo de polimento com uma pasta diamantada de tamanho médio igual a  $0.1\mu m$ .

**Tabela 1 – Valores de propriedades típicas para os ferros fundidos GJV450 e GJV500**

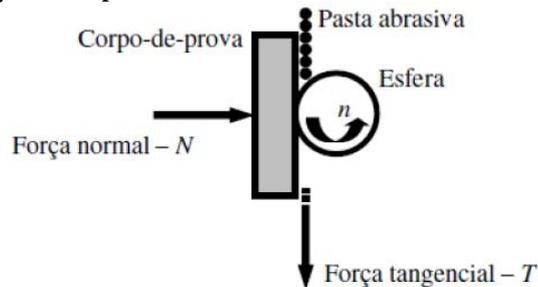
Propriedade	Classe ISO 16112/2006	
	GJV450	GJV500
Limite de resistência (MPa)	450-525	500-575
Limite de escoamento (MPa)	315-365	350-400
Coefficiente de Poisson	0,26	0,26
Dureza típica (HB)	200-250	220-260

### 2.2 Equipamento e procedimentos operacionais de análise

O ensaio de micro abrasão por esfera rotativa livre foi realizado no equipamento Calotest®, pertencente ao Laboratório de Superfícies e Contato (LASC), localizado na Sede Ecoville da UTFPR-Curitiba. Tal ensaio

consiste em uma esfera sobre um eixo que exerce uma força normal  $N$  sobre o corpo de prova e a lama abrasiva de modo que ambos entrem em contato gerando uma cratera que se dá através da remoção de material pelas partículas atritadas como mostrado na Fig. 1.

**Figura 1 - Esquemático das forças e componentes envolvidos no ensaio de micro abrasão por esfera rotativa**



Fonte: Cozza (2011)

Para a realização de tal teste, foi utilizada uma esfera de zircônia com diâmetro de 24,5 mm, uma bomba peristáltica que garantia uma vazão de 7 gotas por minuto (cerca de 0,4 ml/min) da solução diamantada abrasiva, e o corpo de prova foi colocado com uma inclinação de 67° que garante uma força normal estática de 0,1 N (ISO 26424, 2016).

Foram realizados ensaios com a duração de 5, 10, 15 e 20 minutos, com uma rotação empregada de 300 rpm. Desse modo, foram definidos o coeficiente de desgaste e o ponto de estabilização de cada amostra, além de comparar-se o desempenho dos materiais ensaiados.

O coeficiente de desgaste ( $k$ ) pode ser definido como o volume de material desgastado por unidade de força, pode ser calculado pela Eq. (1) (NOTHNAGEL, 1993), que associa o coeficiente de desgaste ao diâmetro da cratera causada pelo ensaio e ao tempo de teste.

$$k = \frac{d^2}{32Ntn} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{4} \left( \frac{d}{r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1)$$

Sendo  $d$  o diâmetro médio das crateras de desgaste [mm],  $N$  a força normal empregada entre a esfera e o corpo de prova [N],  $r$  o raio da esfera utilizada [mm],  $t$  o tempo de ensaio [s] e  $n$  a rotação do eixo [rpm].

O ponto de estabilização é o tempo a partir do qual o coeficiente de desgaste se estabiliza sendo esse o tempo utilizado para a comparação do desempenho de ambos os materiais. Após a obtenção dos dados, foi realizado um teste  $t$  para amostras independentes, ao nível de significância de 5%, cuja Hipótese Nula seria o comportamento do Ferro Fundido GJV 450 ser igual ao do GJV 500 e, conseqüentemente, a Hipótese Alternativa seria o desempenho dos materiais diferirem quando ambos estão submetidos ao mesmo sistema.

### 3 RESULTADOS

Os resultados obtidos após a realização dos ensaios são apresentados nas Tab. 2 e 3, que mostram as médias dos diâmetros das crateras em relação ao tempo de ensaio, assim como seus coeficientes de desgaste, determinados por meio da Eq. (1), para os ferros GJV450 e GJV500, respectivamente



**Tabela 2 – Determinações referentes à classe GJV450 obtidos após a realização dos ensaios microabrasivos**

Tempo de ensaio [min]	Tempo de ensaio [s]	Média do diâmetro [mm]	Coefficiente de desgaste [10 <sup>-6</sup> mm <sup>3</sup> /N.m]
5	300	0,53 ± 0,03	0,43
10	600	0,50 ± 0,02	0,17
15	900	0,52 ± 0,04	0,13
20	1200	0,55 ± 0,01	0,13

Fonte: Autoria própria (2021)

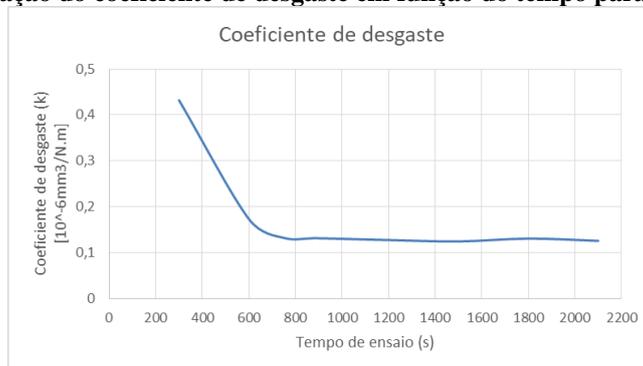
**Tabela 3– Determinações referentes à classe GJV500 obtidos após a realização dos ensaios microabrasivos**

Tempo de ensaio [min]	Tempo de ensaio [s]	Média do diâmetro [mm]	Coefficiente de desgaste [10 <sup>-6</sup> mm <sup>3</sup> /N.m]
5	300	0,49 ± 0,02	0,31
10	600	0,50 ± 0,03	0,16
15	900	0,55 ± 0,01	0,17
20	1200	0,59 ± 0,02	0,16

Fonte: Autoria própria (2021)

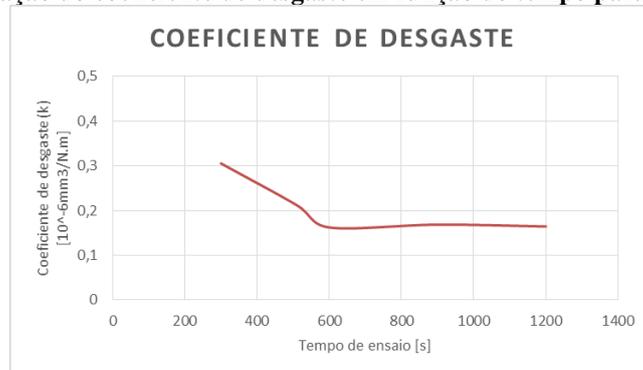
Ao traçar os gráficos referentes aos coeficientes de desgaste encontrados acima, Fig.2 e Fig.3, nota-se que os coeficientes de desgaste dos ferros fundidos GJV450 e GJV500 diminuem consideravelmente com o tempo e tornam-se estáveis ao atingir, aproximadamente, 900 segundos e 600 segundos, respectivamente.

**Figura 2 – Variação do coeficiente de desgaste em função do tempo para a classe GJV450**



Fonte: Autoria própria (2021)

**Figura 3 – Variação do coeficiente de desgaste em função do tempo para a classe GJV500**



Fonte: Autoria própria (2021)

Para poder comparar o desempenho tribológico e analisar o desgaste de ambos os materiais, foram realizados sete ensaios com duração de 15 minutos em cada classe (tempo no qual os dois já teriam atingido seu ponto de estabilização). Os resultados obtidos encontram-se no Tab.4.

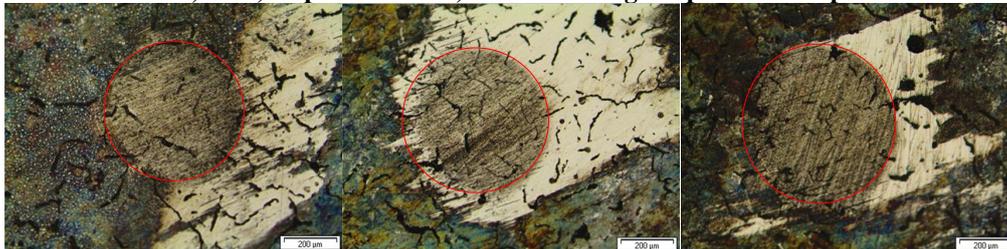
**Tabela 4 - Comparação dos coeficientes de desgastes em regime permanente dos materiais estudados**

	Tempo do ensaio [s]	GJV450		GJV500	
		Diâmetro das crateras [mm]	Coefficiente de desgaste [10 <sup>-6</sup> mm <sup>3</sup> /N.m]	Diâmetro das crateras [mm]	Coefficiente de desgaste [10 <sup>-6</sup> mm <sup>3</sup> /N.m]
<b>Cratera 1</b>	900	0,47 ± 0,02	0,09 ± 0,07	0,51 ± 0,03	0,12 ± 0,06
<b>Cratera 2</b>	900	0,49 ± 0,04	0,11 ± 0,07	0,51 ± 0,03	0,12 ± 0,06
<b>Cratera 3</b>	900	0,49 ± 0,04	0,11 ± 0,07	0,53 ± 0,04	0,15 ± 0,06
<b>Cratera 4</b>	900	0,53 ± 0,03	0,14 ± 0,07	0,55 ± 0,02	0,16 ± 0,06
<b>Cratera 5</b>	900	0,53 ± 0,03	0,14 ± 0,07	0,55 ± 0,04	0,16 ± 0,06
<b>Cratera 6</b>	900	0,55 ± 0,08	0,16 ± 0,07	0,56 ± 0,02	0,17 ± 0,06
<b>Cratera 7</b>	900	0,60 ± 0,03	0,23 ± 0,07	0,56 ± 0,05	0,17 ± 0,06

Fonte: Autoria própria (2021)

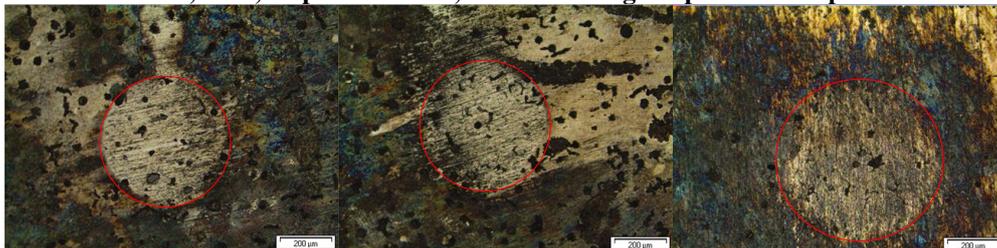
As imagens de algumas das crateras obtidas após os ensaios em regime permanente encontram-se nas Fig. 4 e 5.

**Figura 4 – Crateras 4, 5 e 7, respectivamente, obtidas em regime permanente para a classe GJV450**



Fonte: Autoria própria (2021)

**Figura 5 – Crateras 1, 2 e 7, respectivamente, obtidas em regime permanente para a classe GJV500**



Fonte: Autoria própria (2021)

## 4 CONCLUSÃO

Os dados obtidos anteriormente foram utilizados no teste t para amostras independentes e mostraram que, estatisticamente, ao nível de significância de 5%, os materiais possuem comportamento semelhante quanto ao desgaste quando submetidos aos mesmos esforços, além disso, haja vista que o Ferro Fundido GJV 500 é mais



caro para ser produzido, o resultado acima prevê que, financeiramente, é mais viável a escolha do Ferro Fundido da classe GJV 450 para sistemas que envolverão desgaste abrasivo para com micro partícula.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu orientador e professor, Giuseppe Pintaúde, bem como à doutora e amiga Daniela Wollmann, pela ajuda, compreensão e paciência. Agradeço, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- COZZA, R. C. **Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2011.
- DAWSON, S. **Compacted graphite iron – a material solution for modern Diesel engine cylinder blocks and heads**. China Foundry, v. 6, 1-6, 2009.
- DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 50320: **Wear terms systematic analysis of wear processes classification of wear phenomena**, 1979.
- GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. Ed. Blucher. São Paulo, 2009.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16112: **Compacted (vermicular) graphite cast irons — Classification**. 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 26424:2008. **Technical committee ISO/TC206**, 2016.
- KONTOU, A.; SOUTHBY, M.; MORGAN, N.; SPIKES, H. A. **Influence of dispersant and ZDDP on soot wear**. Tribology Letters, v. 66:157, 1-15, 2018.
- NOTHNAGEL, G. **Wear resistance determination of coatings from cross-section measurements of ball-ground craters**. Surface and Coatings Technology, v.57, 151-154, 1993.
- SAPPOK, A. G.; WONG, V. W. **Detailed chemical and physical characterization of ash species in Diesel exhaust entering aftertreatment systems**. SAE Technical Paper Series, 2007.
- VALE, J. L. **Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de metal dobrado e no comportamento tribológico de superfícies brunidas**. Tese de Doutorado, UTFPR, Curitiba-PR, 2016.
- WOLLMANN, D. **Comportamento tribológico de ferros fundidos vermiculares de alta resistência ensaiados em diferentes níveis de severidade**. Tese de Doutorado, UTFPR, Curitiba-PR, 2021.
- WRITZL, V. **O efeito dos tratamentos de nitretação por plasma e têmpera superficial a laser nas propriedades superficiais de ferros fundidos vermiculares**. Tese de Doutorado, UTFPR, Curitiba-PR, 2018.