

DETERMINAÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO DE POLIMENTO ELETROLÍTICO DE FERROS FUNDIDOS PARA A EXPOSIÇÃO DA GRAFITA SUPERSUPERFICIAL EM CILINDROS BRUNIDOS

João Luiz do Vale, joaovale@utfpr.edu.br¹
Victor de Cerjat Beltrão, victorbeltrao@icloud.com²
Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Londrina.
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Av. dos Pioneiros, 3131. Londrina – Paraná – Brasil
CEP 86036-370

²Universidade Federal do Paraná – UFPR.

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba.

Resumo: As características topográficas das superfícies brunidas, dos cilindros de motores de combustão interna (MCI), mostram-se muito relevantes para o desempenho tribológico. Estudos recentes vem buscando correlacionar a ocorrência do fenômeno chamado de metal dobrado (folded metal) com a presença de grafita na matriz dos ferro fundidos. Para tanto, a correlação deve ser feita entre o metal dobrado e a grafita presente na superfície, ou imediatamente abaixo desta. Contudo, determinados processos de brunimento tendem a recobrir a grafita, de tal modo a ser necessário a aplicação de alguma técnica para a remoção de uma fina camada que exponha esta fase. Este artigo tem como objetivo determinar a melhor condição, de tensão e tempo, para a exposição da grafita em superfícies brunidas utilizando técnica de polimento eletrolítico. O polimento foi realizado na superfície côncava com auxílio de uma máscara de polimento desenvolvida para este fim. Amostras de cilindros brunidas foram retiradas de MCI de ferros fundidos cinzento e vermicular. As caracterizações foram feitas através de metalografia e interferometria de luz branca. Para determinar a condição ideal empregou-se uma avaliação qualitativa em quadros com as diversas condições de polimento ensaiadas. Para a verificação da repetibilidade da técnica, realizaram-se cinco repetições com a condição ideal. Os resultados mostraram repetibilidade satisfatória, com exposição da grafita e ataque da matriz. A rugosidade da região polida apresentou-se consideravelmente uniforme, com alteração significativa da rugosidade em relação à superfície brunida. Ainda, observou-se a remoção da topografia característica da superfície brunida e a camada removida teve pouca variação de profundidade ao longo da região de polimento, com valores próximos a 5 μm . Este valor atende a demanda referente a remoção de camada para a exposição da grafita imediatamente abaixo da superfície.

Palavras-chave: Polimento eletrolítico; Ferros fundidos; Brunimento; Exposição de grafita.

1. INTRODUÇÃO

Em fabricação seriada, comumente o acabamento dos cilindros dos motores de combustão interna (MCI) são obtidos por brunimento (Sabeur *et al.*, 2013). As características topografias destas superfícies mostram-se muito relevantes para o desempenho tribológico dos MCI (Corral e Calvet, 2011) e são constituídas de platôs e sulcos, conforme pode ser visualizado na Figura 1. Os platôs estão, geralmente, relacionados aos fenômenos de atrito e de desgaste, pois são as regiões da superfície em que há o contato mecânico com os anéis do pistão. Já os sulcos estão associados à lubrificação e funcionam como reservatórios (Mezghani *et al.*, 2012), formando uma rede de canais por onde o óleo pode fluir (Corral e Calvet, 2011).

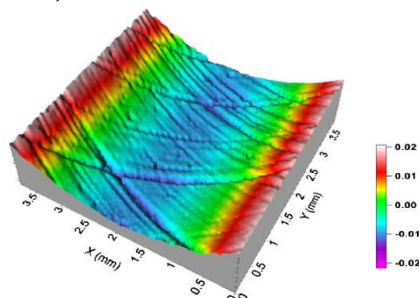


Figura 1. Imagem obtida por interferometria de luz branca da textura típica de uma superfície brunida de Sabeur *et al.* (2013).

Um fenômeno inerente ao processo de brunimento é o metal dobrado. Estas porções de material, também conhecidas como *folded metal* ou *blechmantel*, tendem a obstruir os sulcos e posteriormente podem ser desprendidas durante a operação do motor. Com isso, há tendência de riscamento no sentido axial do cilindro, o que permite a passagem de fluídos para a câmara de combustão (Dimkovski *et al.*, 2009). A Figura 2 apresenta uma mapa com uma ordenação qualitativa de superfícies seriamente até levemente defeituosas em relação ao metal dobrado.

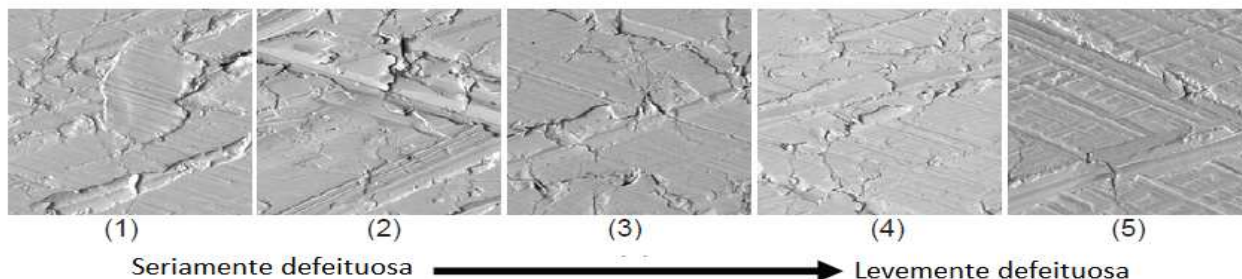


Figura 2. Ordenação visual, de imagens obtidas por MEV, de superfícies brunidas com diferentes graus de defeito de Wang e Leon (2011).

Estudos recentes vem tentando correlacionar o metal dobrado com a grafita presente nos ferros fundidos. Vale (2016) mostrou forte correlação estatística entre o metal dobrado e a fração de grafita. Vale *et al.* (2016) obtiveram resultados de formação de metal dobrado diretamente relacionado com grafita em ensaios de riscamento em ferros fundidos com ferramenta de geometria definida.

Atualmente, os autores deste trabalho vem tentando aplicar técnicas de análise de imagens para sobrepor, exatamente na mesma região avaliada, quantificações de metal dobrado sobre a quantificação de grafita. Contudo, devido ao recobrimento da grafita causada em alguns processos de brunimento, traz-se a tona a necessidade do desenvolvimento de alguma técnica para a remoção de uma fina camada que exponha esta fase.

Este artigo tem como objetivo identificar a melhor condição para polimento eletrolítico em superfícies côncavas de cilindros brunidos, de ferros fundidos, para exposição da grafita subsuperficial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram retirados de cilindros de dois blocos de motor de combustão interna, modelo Ford Griffin V8. Estes blocos, providos pela empresa Tupy S.A., foram fundidos um em ferro fundido cinzento e outro em ferro fundido vermicular. As classes destes materiais são, respectivamente, FC 250 (norma ABNT NBR 6589) e GJV450 (norma ISO 16112). Maiores detalhes sobre as propriedades destes materiais podem ser encontradas em Guesser (2009). Após a fundição, os cilindros foram mandrilhados e brunidos. O processo de brunimento, em particular, foi do tipo platô. Para esta etapa utilizaram-se ferramentas de diamante – D151 e D15 para desbaste e acabamento, respectivamente. A velocidade de avanço e a rotação do processo foram 12,4 m/min e 130 rpm.

2.2. Métodos

Para o polimento eletrolítico foi utilizado equipamento ElectroMet® 4 – Buehler, o qual pode ser visualizado na Figura 3. Em linhas gerais, o procedimento de polimento é realizado com o posicionamento da amostra sobre uma máscara. Esta deve permitir contato conforme com a superfície a ser polida, e ainda, direcionar a solução para a região de polimento. O contato elétrico se dá com uma haste que, além desta função, aplica uma força que mantém a amostra fixa. As regulagens possíveis no equipamento são: tensão, tempo e vazão da solução.

A solução utilizada, e indicada pelo fabricante para ferros fundidos, tem pH ácido, e apresenta os seguintes constituintes para base volumétrica de 1 litro:

- Etanol (95% de concentração) 700 ml
- 2-Butoxi-Etanol 100 ml
- Ácido perclórico (30% de concentração) 200 ml

Para a realização destes ensaios foi necessária a fabricação de uma máscara, de poliamida 6, que permitisse o contato conforme com a superfície côncava do cilindro. A Figura 4(a) e (b) apresentam detalhes da máscara e da montagem com o corpo de prova. Deste modo, a região de polimento se manteve restrita ao rasgo de 6 x 20 mm na parte central da máscara.



Figura 3. Equipamento para polimento.



(a) Máscara



(b) Montagem com o corpo de prova

Figura 4. Detalhe da máscara de polimento eletrolítico.

As superfícies dos corpos de prova foram limpas com álcool isopropílico antes do procedimento. Ainda, registra-se que melhores resultados foram obtidos com: esmerilhamento do corpo de prova na região de contato elétrico; e regulação para maiores níveis de vazão da solução. Estas duas ações resultaram em uma corrente elétrica com menor variação durante o ensaio.

Levou-se em conta os limites indicados pelo fabricante para a determinação das faixas de tensão e de tempo de polimento eletrolítico. Com isso, os valores foram de 20 a 40 V e 30 a 90 s, respectivamente. Evitando-se ensaios fatorial para a varredura das faixas, as condições de ensaio foram avaliadas em um quadro qualitativo, cujo intuito foi identificar a melhor condição de polimento eletrolítico. Foram necessárias duas baterias de ensaios, com 5 condições cada, para a identificação desta condição. Nestas etapas, a avaliação qualitativa foi realizada em imagens obtidas por microscopia óptica.

Após a determinação da condição ideal de polimento, realizaram-se cinco repetições para avaliação da repetibilidade do ensaio. Realizaram-se avaliações da topografia – e de parâmetros de rugosidade – e verificação da profundidade de remoção de camada. Estes procedimentos foram realizados em interferômetro de luz branca, Taylor Hobson Talysurf CCI Lite. Este equipamento possui resolução de 1024 x 1024 pixels com área de amostragem de 0,825 x 0,825 mm, resolução vertical de 0,01 nm e repetitividade de medição de 0,002 nm. O esquema de medição é apresentado na Figura 5. Medições de rugosidade foram executadas na superfície brunida e na região de polimento (na parte central e na borda). Para a verificação da camada removida, realizou-se uma varredura no sentido axial do cilindro, desde a região brunida até a parte central da região polida. Valores médios de profundidade foram apresentados, com incrementos de 1 mm no sentido axial, e referenciados em relação à região de transição, conforme indicado na Figura 5. Estes valores de profundidade foram obtidos através de perfis de ondulação da superfície.

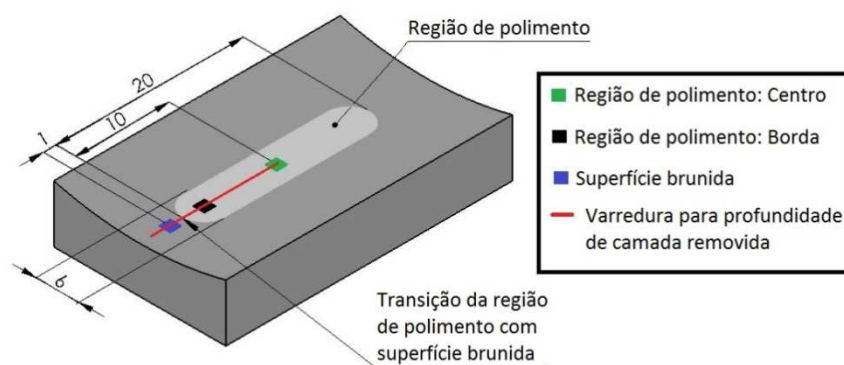


Figura 5. Esquema de medição de rugosidade e de remoção de camada.

Os parâmetros de rugosidade, definidos de acordo com Whitehouse (1994) e, avaliados neste trabalho foram:

- Sa: Média aritmética das alturas das rugosidades [μm];
- Sq: Média quadrática das alturas das rugosidades [μm];
- Ssc: Curvatura média das asperezas [mm^{-1}];
- Sds: Densidade de picos [mm^{-2}];
- Spk: Altura de pico reduzida (Reduced peak height) [μm];
- Sk: Altura central (Core height) [μm];
- Svk: Altura de vale reduzida (Reduced valley height) [μm];
- Sr1: Upper bearing area [%];
- Sr2: Lower bearing area [%].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Determinação da condição ideal para polimento eletrolítico

A Figura 6 apresenta a superfície típica do cilindro brunido antes do polimento eletrolítico. Pode-se observar uma topografia característica com sulcos e platôs (Corral e Calvet, 2011; Mezghani et. al., 2012).

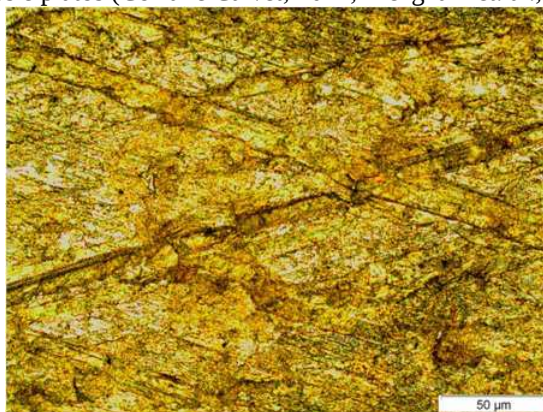


Figura 6. Imagem obtida por microscopia óptica da superfície brunida típica antes do polimento eletrolítico.

O resultado completo da avaliação qualitativa é apresentado na Figura 7. Foram necessárias duas baterias de ensaios, com cinco condições de tensão e tempo. Neste quadro são apresentados as indicações 1 e 2, que são referentes a 1ª e 2ª bateria, respectivamente.

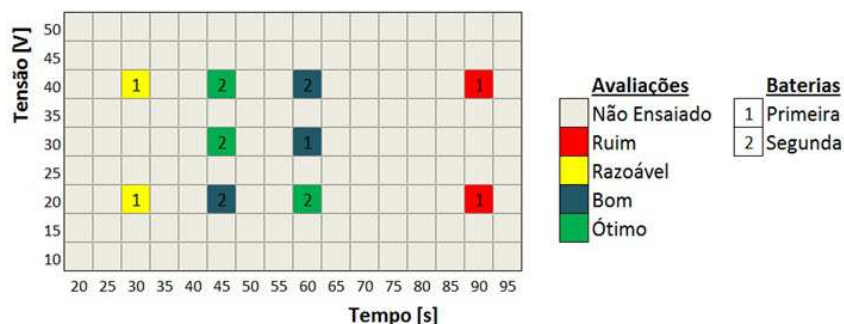


Figura 7. Quadro qualitativo para identificação da condição ideal de polimento.

Para a 1ª bateria, foram escolhidos as condições limites das faixas, de tensão e de tempo, mais o ponto central. Os resultados, seguindo a disposição do quadro da Figura 7, são apresentados na Figura 8. Observa-se que para tempos de 90 s as superfícies apresentam-se mais escuras e com resultado ruim. Contudo, resultados razoáveis foram obtidos, em ambas as tensões para o tempo de 30s. Já para a condição central obteve-se condição avaliada como boa. Estas avaliações foram identificadas no quadro da Figura 7. Chama-se a atenção, ainda, que houve ataque à matriz com revelação de perlita. Ademais, houve alteração significativa da rugosidade superficial, com eliminação da topografia característica apresentada na Figura 6.

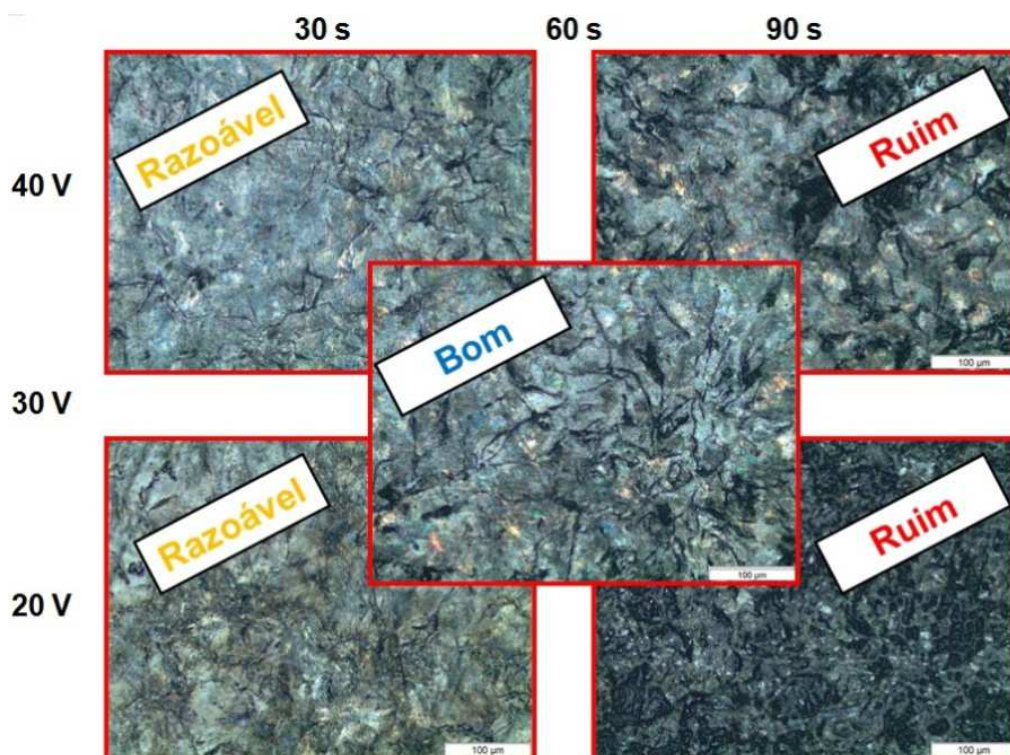


Figura 8. Imagens de microscopia óptica e avaliação qualitativa da 1ª bateria de ensaios de polimento eletrolítico.

Os resultados da 2ª bateria são apresentados na Figura 9. Obteve-se duas condições avaliadas como boa e três como ótima. Considerando, ainda, o contraste entre a grafita e matriz - característica importante para o procedimento de segmentação através de análise de imagens - optou-se pela condição de 30 V e 45 s.

3.2. Avaliação da repetibilidade do ensaio

A repetibilidade do ensaio foi avaliada em 5 corpos de prova polidos na condição ideal de 30 V e 45 s. Todos os ensaios resultaram em superfícies polidas com qualidade ótima, exposição da grafita e revelação da perlita. Dois exemplos são apresentados na Figura 10.

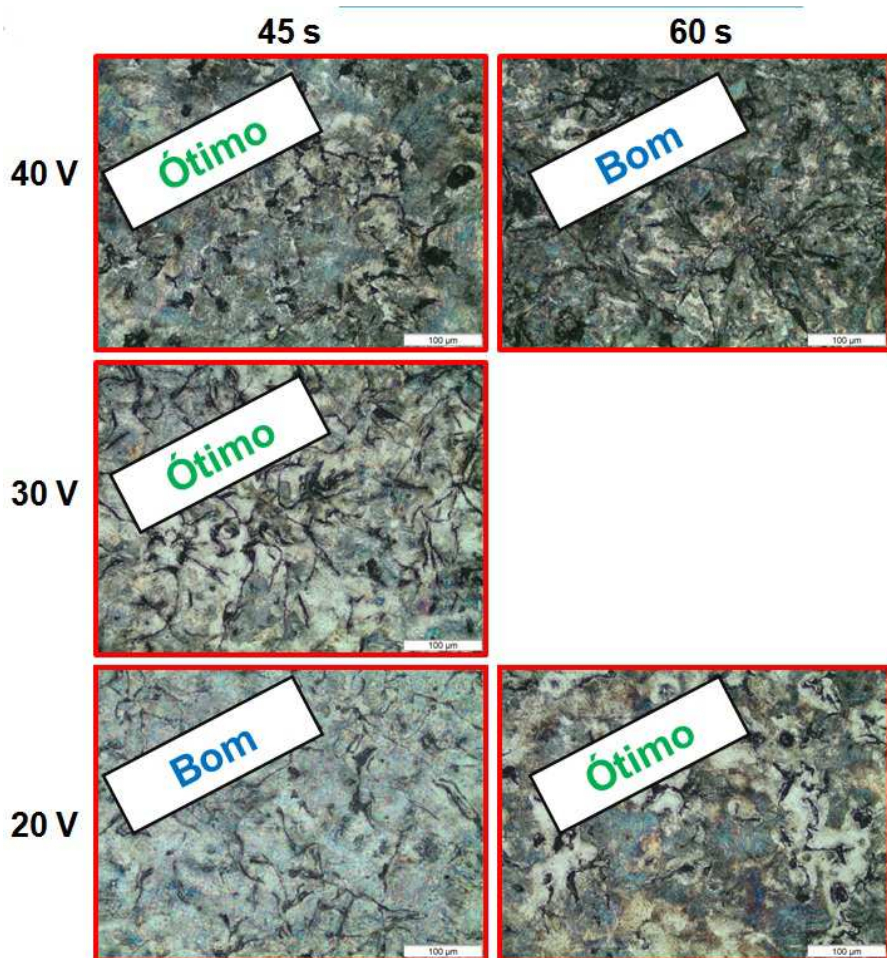


Figura 9. Imagens de microscopia óptica e avaliação qualitativa da 2ª bateria de ensaios de polimento eletrolítico.

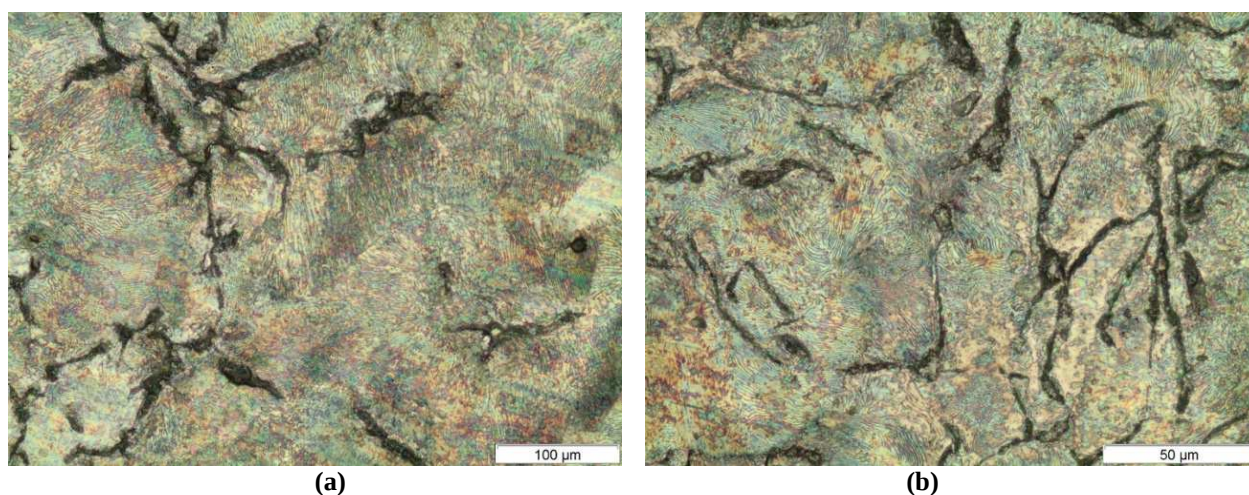


Figura 10. Imagens de microscopia óptica para condição ideal de polimento eletrolítico [30 V - 45 s].

A Figura 11(a) e (b) mostram a topografia 3D antes e após o polimento eletrolítico. Observa-se que o polimento não acontece de modo homogêneo, o que resulta no surgimento de uma topografia muito distinta da superfície brunida. Nota-se a formação de grandes porções irregulares (ou 'ilhas') com picos. E ainda, regiões mais profundas nos contornos destas 'ilhas'.

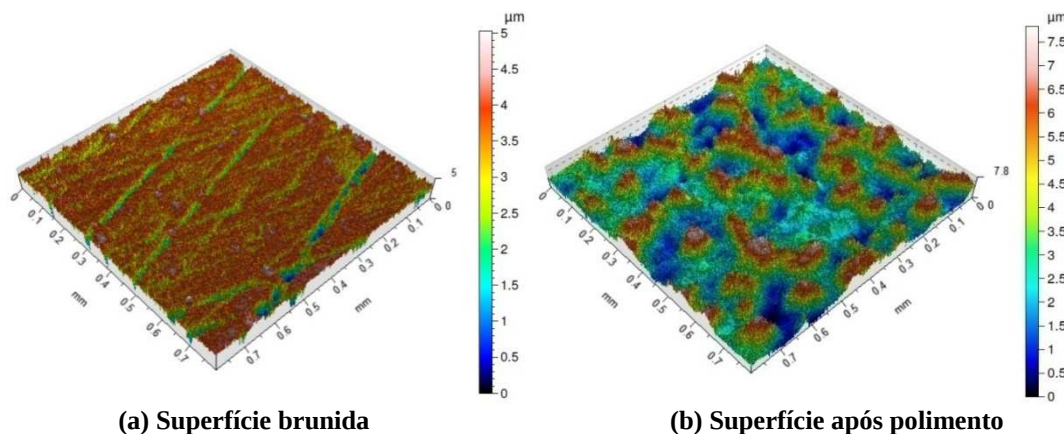
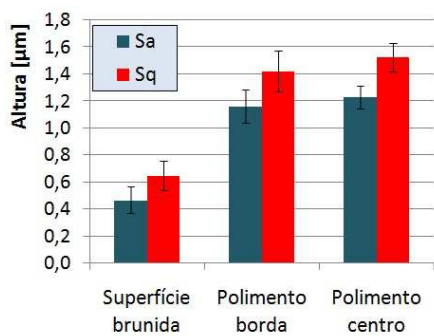


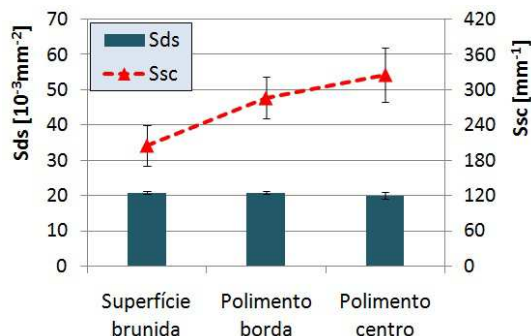
Figura 11. Topografia típica das superfícies antes e após polimento eletrolítico.

A Figura 12 apresenta alguns parâmetros de rugosidade das superfícies. Observa-se, de modo geral, alteração significativa dos parâmetros com o polimento eletrolítico. Ademais, comparando-se os resultados da borda com a parte central da região de polimento, pode-se constatar que o procedimento teve nível aceitável de homogeneidade. Pode-se concluir que o polimento causou, notoriamente, as seguintes alterações na superfície:

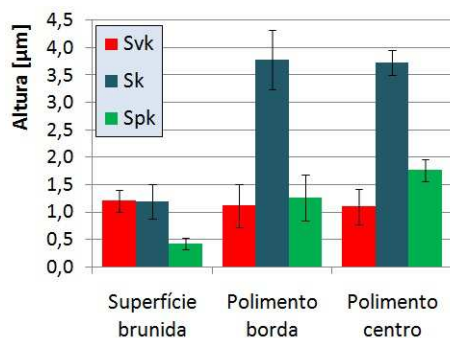
- Elevação da rugosidade associada aos parâmetros de altura S_a e S_q ;
- Os picos tiveram:
 - ✓ Aumento de altura (S_{pk});
 - ✓ Aumento de curvatura (S_{sc});
 - ✓ Maior percentual dentro topografia (S_{r1}); ou seja, aumento de regiões dentro da topografia associada a picos;
 - ✓ Pouca alteração da densidade de picos por área (S_{ds});
- Aumento do *core* (S_k), o que acompanha a tendência de aumento dos parâmetros de altura;
- A altura dos vales (S_{vk}) ficou praticamente inalterada. Supõem-se que este comportamento se deve, principalmente, à formação dos contornos mais profundos em torno das 'ilhas' formadas com o polimento, conforme discutido na Figura 11.



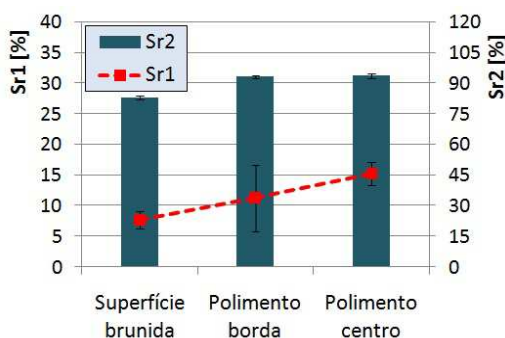
(a) Parâmetros de altura



(b) Parâmetros híbridos



(c) Parâmetros funcionais - Família k



(d) Parâmetros funcionais - $Sr1$ e $Sr2$

Figura 12. Parâmetros de rugosidade antes e após polimento eletrolítico.

Obviamente, com a avaliação da Figura 11 e dos parâmetros de rugosidade da Figura 12, verifica-se a destruição da funcionalidade da superfície brunida. Acrescenta-se que muito embora ocorreu aumento, de modo geral, da rugosidade da superfície após o polimento, não houve prejuízo para a avaliação das superfícies utilizando técnica de microscopia óptica.

Para a caracterização da profundidade da remoção de camada, foram realizadas varreduras no sentido axial do cilindro após o polimento. A Figura 13 mostra um exemplo de topografia 3D e de um perfil de ondulação.

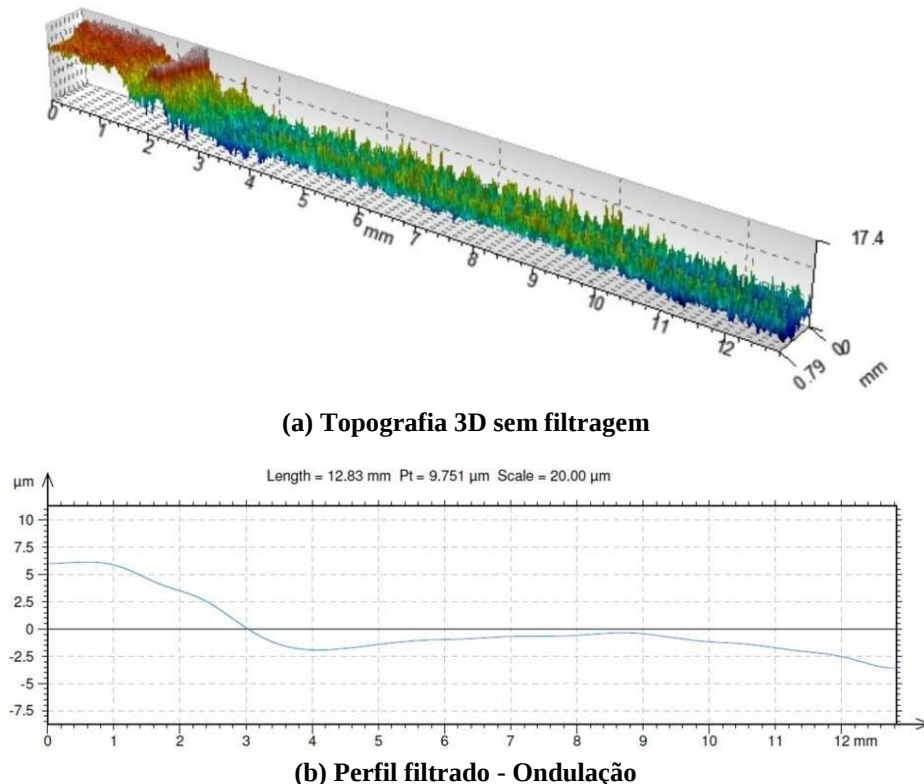


Figura 13. Caracterização da remoção de camada desde a superfície brunida até o centro da região onde ocorreu o polimento eletrolítico.

A profundidade média em relação a distância, relativa à transição da região de polimento, é apresentada na Figura 14. Chama-se a atenção que esta caracterização se refere a metade da região de polimento eletrolítico, conforme indicado na Figura 5. Nota-se que a profundidade apresenta grande dispersão, mas seus valores médios são muito similares ao longo da região de polimento, principalmente após 2 mm da transição da região de polimento. O valor médio para a profundidade removida foi de $-4,6 \pm 2,0 \mu\text{m}$. Muito embora o coeficiente de variação seja de 42,5 %, os valores obtidos estão na ordem de micrometros. Este resultado demonstra que a remoção de camada realizada nesta condição atende a demanda deste procedimento para evidenciar a grafita subsuperficial, considerando que esta fase apresenta dimensões próximas a $10 \mu\text{m}$ (8).

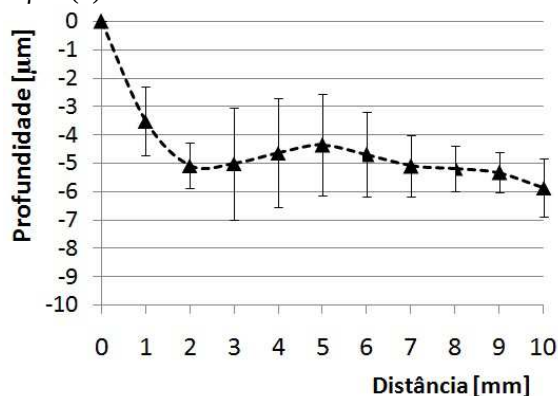


Figura 14. Profundidade média da camada removida em relação a distância relativa à transição da região de polimento eletrolítico.

4. CONCLUSÕES

Do presente trabalho, em que foi determinado a melhor condição de polimento eletrolítico, de ferros fundidos cinzento e vermicular; e avaliado a repetibilidade do ensaio, concluiu-se que:

- A utilização de uma máscara especial para obter contato conforme com a superfície côncava do cilindro foi fundamental;
- Verificou-se melhores resultados e corrente elétrica com menor variação com: esmerilhamento do corpo de prova para a remoção da camada de óxido na região do contato elétrico e regulagem de maiores níveis de vazão da solução;
- Melhores resultados referentes à qualidade da superfície polida foram obtidos com relativos menores tempos;
- A condição ideal de polimento foi identificada, através de avaliação qualitativa de imagens obtidas por microscopia óptica, para a condição de tensão de 30 V e tempo de 45s;
- O polimento eletrolítico, além de expor a grafita, atacou a matriz dos ferros fundidos, com consequente revelação de perlita;
- A avaliação da repetibilidade dos ensaios para a condição ideal mostrou-se satisfatória. Houve alteração significativa dos parâmetros de rugosidade. Todavia, isso ocorreu de modo consideravelmente homogêneo ao longo da região de polimento;
- A profundidade da camada removida foi da ordem de micrometros e atende a demanda do desenvolvimento desta técnica para a exposição da grafita subsuperficial. Contudo, observou-se que comportamento da profundidade de camada removida é mais homogêneo a partir de 2 mm em relação a transição da região de polimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao suporte dado pelo PPGEM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais). Adicionalmente, nosso agradecimento especial à empresa Tupy pelo fornecimento das amostras e pelo incentivo na realização de estudos em parceria com a UTFPR firmado, neste caso, em acordo de cooperação técnica ACT 10/2015 TUPY-UTFPR.

6. REFERÊNCIAS

- Corral, I. B.; Calvet, J. V. Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools. *Precision Engineering*. v. 35, p. 289-293, 2011.
- Dimkovski, Z.; Anderberg, c.; Ohlsson, r.; Rosén, b. g. Thomas, t. r. Quantification of the cold worked material inside the deep honing grooves on cylinder liner surfaces and its effect on wear. *Wear*. v. 267, p. 2235-2242, 2009.
- Guesser, W. L. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. São Paulo, SP: Blucher, 336 p. ISBN 9788521205012. 2009.
- Mezghani, S.; Demirci, I.; Zahouani, H.; Mansori, M. L. The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. *Precision Engineering*. v. 36, p. 210-217, 2012.
- Sabeur, M.; Ibrahim, D.; Mohamed, E. M.; Hassan, Z. Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system. *Tribology International*. v. 59, p. 240-247, 2013.
- Vale, J. L. Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de metal dobrado e no comportamento tribológico de superfícies brunidas. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, 2016.
- Vale, J. L.; Cortz, M.; BERTOLINI, V. M. S.; SILVA, C. H.; PINTAUDE, G. Comparison of scratch resistance of lamellar and compacted graphite irons used in cylinder liners. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2016.
- Wang, L.; Leon, F. P. Local Analysis of Honed Surfaces in Microscopic Images. *SENSOR e TEST Conferences 2011 - OPTO Proceedings*. section 3.4, p. 80-84, 2011.
- Whitehouse, D. J. *Handbook of Surface and Nanometrology*. London: Institute of Physics Publishing, 1994.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DETERMINATION OF THE BEST CONDITION OF ELECTROLYTE POLISHING OF CAST IRONS FOR THE REVELATION OF THE SUBSUPERFICIAL GRAPHITE OF HONED CYLINDERS

João Luiz do Vale, joaovale@utfpr.edu.br¹

Victor de Cerjat Beltrão, victorbeltrao@icloud.com²

Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br³

¹Federal University of Technology - Paraná – UTFPR – Campus Londrina.

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Pioneiros Avenue, 3131. Londrina – Paraná – Brasil

ZIP CODE 86036-370

²Federal University of Paraná – UFPR.

³Federal University of Technology - Paraná – UTFPR – Campus Curitiba.

Abstract: As características topografias das superfícies brunidas, dos cilindros de motores de combustão interna (MCI), mostram-se muito relevantes para seu desempenho tribológico. Estudos recentes vem buscando correlacionar a ocorrência do fenômeno chamado de metal dobrado (folded metal) com a presença de grafita na matriz dos ferro fundidos. Para tanto, a correlação deve ser feita com a caracterização do metal dobrado com a grafita presente na superfície, ou imediatamente abaixo desta. Contudo, determinados processos de brunimento tendem a recobrir a grafita, de tal modo a ser necessário a aplicação de alguma técnica para a remoção de uma fina camada que exponha esta fase. Este artigo tem como objetivo determinar a melhor condição, de tensão e tempo, para a exposição da grafita em superfícies brunidas utilizando técnica de polimento eletrolítico. O polimento foi realizado na superfície côncava com auxílio de uma máscara de polimento desenvolvida para este fim. Amostras de cilindros brunidas foram retiradas de MCI de ferros fundidos cinzento e vermicular. As caracterizações foram feitas através de metalografia e interferometria de luz branca. Para determinar-se a condição ideal empregou-se avaliação de quadro qualitativo com as diversas condições de polimento ensaiadas. Para a verificação da repetibilidade da técnica, realizaram-se cinco repetições com a melhor condição. Os resultados mostraram repetibilidade satisfatória, com exposição da grafita e ataque da matriz. A rugosidade da região polida mostrou-se consideravelmente uniforme, com alteração significativa da rugosidade em relação a superfície brunida. Ainda, observou-se a remoção da topografia característica da superfície brunida. A camada removida se mostrou com pouca variação de profundidade ao longo da região de polimento, com valores próximos a 5 μm . Este valor atende a demanda referente a remoção de camada para a exposição da grafita imediatamente abaixo da superfície.

Keywords: Electrolyte polishing; Cast irons; Honing; Revelation of graphite.