

Torneamento de Discos de Freio: Avaliação da Topografia da Superfície e do Fenômeno *Open Grain*

Ulisses Borges Souto*
 Wisley Falco Sales*
 Sandro Cardoso Santos*
 Ernani Sales Palma*

*Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Wilson Guesser**
 Ivo Baumer**

** Tupy Fundições e UDESC, Joinville, SC, Brasil

Copyright © 2002 Society of Automotive Engineers, Inc

RESUMO

Neste trabalho investigou-se a influência da profundidade de corte (a_p) no aparecimento de cavidades, conhecidas como *open grain*, no torneamento de discos de freio de ferro fundido cinzento. Foram mantidos constantes a velocidade de corte (v_c) em 240 m/min e o avanço (f) em 0,1 mm/rev. Em todas as condições usinadas, foram realizadas medições dos parâmetros R_a , R_z e R_y da topografia da superfície. Foram, ainda, retiradas amostras para análise no microscópio ótico e medições das dimensões das cavidades. O estudo se concentrou nos parâmetros de usinagem em que o fenômeno do *open grain* foi observado, para que este se tornasse mais previsível e compreendido, prevenindo seu aparecimento em condições reais de fabricação. Como resultados, verificou-se que o aumento da profundidade de corte aumenta as dimensões das cavidades superficiais.

INTRODUÇÃO

A utilização de discos de freio em automóveis é uma tecnologia empregada e consagrada já há algumas décadas. Modernamente a indústria automobilística tem especificado ferros fundidos com valores crescentes de condutividade térmica, de modo a diminuir a temperatura em serviço do freio (disco/pastilha), em particular para discos de freio para caminhões. Isso é conseguido com o aumento da quantidade de grafita na microestrutura, já que esta é a fase importante para a condutividade térmica. Este aumento da quantidade de grafita é obtido pelo aumento do teor de carbono da liga, o que traz como consequência um aumento também do tamanho das partículas de grafita. Como a grafita exposta na superfície de usinagem sofre fratura, a superfície usinada tende a apresentar rugosidades, fenômeno conhecido como “open grain”.

A superfície usinada do disco não pode ser muito rugosa, pois provocaria um desgaste prematuro das pastilhas além de uma perda de modulação e progressividade do esforço no pedal do freio mas, por outro lado, não podem ser lisas ou “espelhadas” por comprometer a capacidade de frenagem pela diminuição do atrito entre os componentes, ou seja, deve haver um comprometimento e a topografia gerada deve atender da melhor maneira às duas exigências simultaneamente.

Outro aspecto negativo do surgimento de cavidades superficiais está no fato que eles podem atuar como pontos de concentração de tensão e favorecer o aparecimento de trincas de origem mecânicas e/ou térmicas, devido aos ciclos repetidos de aquecimento e resfriamento, diminuindo significativamente a resistência à fadiga e consequentemente a vida útil dos discos de freio.

No chão-de-fábrica, o *open grain* é uma realidade, ou seja, um problema que deve ser resolvido pelos responsáveis pela fabricação. Mas a dinâmica em que eles estão envolvidos, não os permite que façam estudos detalhados sobre os fatores relevantes que determinam o surgimento do fenômeno. Para isto, tornou-se necessário utilizar de metodologias científicas, embasadas teoricamente e acompanhadas por ensaios experimentais, o que se propõe realizar neste trabalho.

Este tema é de grande importância para a indústria, não apenas para as que fabricam discos de freio, mas também para aquelas que trabalham com ferro fundido cinzento em outras aplicações.

Para estes objetivos é que direcionou-se a pesquisa, buscando melhorar os conhecimentos e domínio dos parâmetros de corte na usinagem de discos de freio de

ferro fundido cinzento. Neste trabalho, o parâmetro sob investigação foi a profundidade de corte, pois de acordo com escassa literatura disponível sobre o assunto, ela é o parâmetro mais influente na craterização da superfície usinada [1].

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A parte experimental deste trabalho consiste na usinagem das faces dos discos de freio (fig. 1) que entram em contato com as pastilha e posterior análise de suas características.



Figura 1. Discos de freio no estado bruto de fundição.

As operações de usinagem usadas em discos de freio são torneamento e furação. Neste caso específico o interesse foi voltado apenas para a operação de torneamento pois, apenas este determina as características finais das superfícies que participam do sistema tribológico que promove a frenagem do veículo.

PREPARAÇÃO DOS DISCOS - Para a preparação dos discos, foi usado um torno convencional IMOR Oficina 420 e pastilhas de metal duro Sandvik classe K 10. Esta preparação fez-se necessária em virtude do disco vir com elevada concentração de óxidos e erros de forma, originários do processo de fundição.

No diâmetro externo do disco foi retirado material para garantir o balanceamento da peça em altas rotações. No diâmetro mais interno também foi promovido a retirada destas camadas para que a superfície ficasse plana o suficiente para assegurar boa fixação na máquina-ferramenta.

Nas pistas de frenagem a preocupação durante a usinagem de preparação foi a de garantir o paralelismo desta com a superfície oposta, aquela que está em contato com a placa do torno. Esta parte da preparação foi realizada no torno CNC ROMI, modelo Centur 30D (fig. 2), que também foi usado nos experimentos deste trabalho.



Figura 2. Torno CNC ROMI, modelo Centur 30D.

De um dos discos, foi retirado uma amostra para que esta fosse levada ao microscópio ótico Neophot, capturada imagem e feita a metalografia no *software* de análise de imagens Quantkov.

Os discos de freio foram produzidos em ferro fundido cinzento, com alto teor de carbono (3,75 %C – 2,0 %Si), apresentando em sua microestrutura grafitas tipos A e C, com tamanhos 3 e 4. Corpos-de-prova retirados da peça apresentaram, em ensaio de penetração por cunha, limite de resistência de 210 MPa, e valores de dureza de 195 HB (superfície) e 180 HB (núcleo).

Para que as superfícies dos discos fossem analisadas imediatamente após cada ensaio no microscópio ótico, surgiu a necessidade de se criar um dispositivo de apoio dos mesmos. Como cada um destes discos, sem nenhuma operação de usinagem, pesa cerca de 3 kg e também eram conduzidos inteiros para as avaliações, este suporte tinha como função equilibrá-los e através de um mecanismo de rosca, mantê-los sempre paralelos à mesa acima da objetiva, mesmo depois cada passe.

REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS – Os ensaios de usinagem consistiram em varrer algumas faixas de profundidade de corte para a avaliação das condições em que as superfícies se encontrariam e principalmente se apareceria as cavidades que caracterizam o *open grain*.

As condições iniciais dos testes foram feitas fixando-se uma velocidade e o avanço e variando-se as profundidades. Esta velocidade ($v_c = 240$ m/min) foi usada pelo fato de estar contida na faixa adotada na indústria para o torneamento de discos de ferro fundido cinzento com ferramentas de metal duro.

Os valores dos parâmetros de corte empregados foram: $v_c = 240$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ e $3,0$ mm.

A ferramenta de corte usada foi fabricada pela Sandvik, em metal duro revestido com Ti (C,N), Al₂O₃ e TiN da classe K 10. A geometria empregada foi: ângulo de inclinação de $\lambda = -6^\circ$ e ângulo de saída de $\gamma = -6^\circ$. A geometria é fornecida pelo suporte, mas como a ferramenta empregada apresentava quebra cavaco, o ângulo de saída torna-se então ligeiramente positivo. A referência do fabricante para a ferramenta e suporte são WNMG 06 04 08 – KM 3005 K10 e MWLNR/R 2525M06, respectivamente.

A máquina empregada para a usinagem foi o torno CNC ROMI, modelo Centur 30 D.

PREPARAÇÃO DOS CORPOS PARA AS MEDIÇÕES - Após cada passe no torno, os discos eram retirados e levados ao laboratório de materiais para serem realizadas as medições necessárias.

Porém, antes de iniciar as medições, foram feitas marcações nos corpos, de acordo com fig. 3, para que as medições sempre seguissem o mesmo critério e coletassem medidas representativas do mensurando. A primeira destas marcações consistiu em duas faixas diametralmente opostas, com 10 mm de espessura e ao longo de todo o raio usinado, que serviriam de limites para que se pudesse percorrer uma área relevante no microscópio. A segunda marcação consistiu de seis raios, a 60° uns dos outros, com a finalidade de servir de referência para a utilização do rugosímetro.

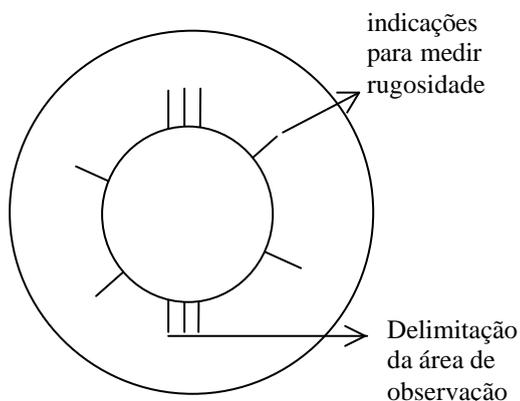


Figura 3. Marcações nos discos para medições

Com os discos posicionados no microscópio ótico Carl Zeiss, modelo Neophot 21, as imagens foram capturadas com uma objetiva de 5x e com oculares de 8x, 12,5x e 20x. Com isto, os aumentos obtidos foram de 40, 62,5 e 100 vezes.

Estas imagens foram levadas para um *software* de análise de imagem Quantkov, no qual forneceu valores, para as cavidades, de diâmetro equivalente médio, área média e percentual total. Foi utilizado o aumento intermediário de 62,5 vezes para a quantificação destas imagens. O aumento de 100 vezes foi usado para uma

observação mais próxima de alguma cavidade e o de 40 vezes para uma observação mais abrangente da superfície.

Na seqüência, o disco foi disposto em uma bancada para medição da rugosidade, por meio de um rugosímetro Mitutoyo, modelo Surftest 211. O rugosímetro foi posicionado radialmente em cada um dos seis marcas previamente demarcadas ao longo da superfície usinada, obtendo assim seis valores de R_x , R_z e R_y , segundo a Norma ISO 3685 [2], para cada disco. Utilizou-se *cut-off* de 0,8 mm e as medições foram realizadas na direção perpendicular às marcas de avanço, promovidas pela ferramenta na superfície.

Finalmente, a pastilha foi retirada do suporte e realizada a medição do desgaste de flanco em microscópio ótico Carl Zeiss graduado com resolução de 0,001 mm. Como em alguns destes passes constatou-se a presença de desgaste superiores a 0,1 mm, justificou-se que cada passe fosse feito com uma aresta de corte nova com o intuito de assegurar que um desgaste qualquer na pastilha não influenciasse nos resultados dos experimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos experimentos mediu-se valores de rugosidade, o que permitiu a construção dos gráficos do valor médio do parâmetro avaliado e dos seus respectivos desvios padrões.

As figuras 4 a 6 mostram os gráficos dos parâmetros de rugosidade R_a , R_y e R_z , respectivamente, em função das profundidades investigadas no torneamento dos discos.

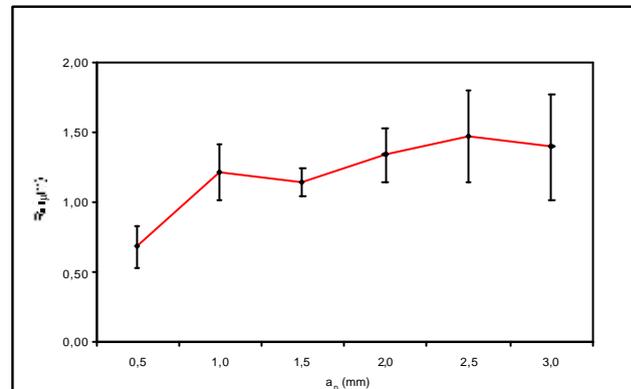


Figura 4. Rugosidade R_a em função da profundidade.

Com o aumento da profundidade de corte, aumenta também a área de contato cavaco-ferramenta e conseqüentemente a força de usinagem. Isso pode incorrer em instabilidades dinâmicas na máquina-ferramenta e conseqüentemente em vibrações, o que se reflete na qualidade da superfície usinada, aumentando os parâmetros de amplitude que caracterizam a topografia da superfície [3] e [4]. Este efeito pode ser minimizado, ou até eliminado, em máquinas de elevada rigidez, com sistemas de fixação da ferramenta e fundações adequadamente projetados.

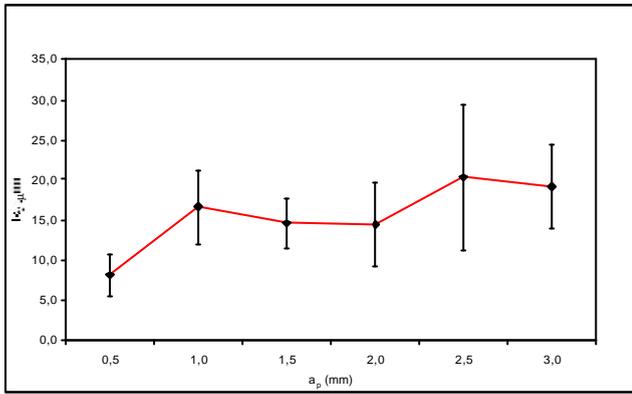


Figura 5. Rugosidade R_y em função da profundidade.

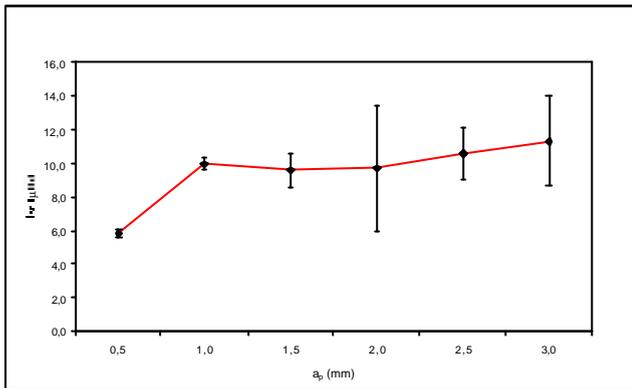


Figura 6. Rugosidade R_z em função da profundidade.

As figuras 4 a 6 indicam que há uma tendência de se aumentar os valores dos parâmetros de topografia com o aumento da profundidade de corte. Os maiores valores das médias e dos desvios padrões encontrados se situam na faixa de 2,5 e 3,0 mm da profundidade de corte, sendo que estas faixas de a_p estão mais voltadas para operações de desbaste.

Desses gráficos também observa-se que, para profundidades de corte de 1,0 mm e superiores, todos os três parâmetros de rugosidade tendem a estabilizar-se em valores mais elevados que os obtidos para a profundidade de 0,5 mm. Isto pode estar relacionado à faixa de maior estabilidade dinâmica do sistema, mas para isso dever-se-ia monitorar as acelerações de vibrações durante a variação da profundidade de corte.

Nas figuras 7 a 9 mostram-se como as superfícies se encontravam logo após serem usinadas, analisadas no microscópio ótico. Nestas superfícies são nítidas as marcas de usinagem e também a presença das cavidades, objeto desta investigação, que são as regiões escuras na imagem.

As análises das figuras 7 a 9, que correspondem às profundidades de corte 0,5, 1,0 e 1,5 mm respectivamente, verifica-se que há, comparativamente, menos cavidades que nas outras profundidades, além de estas serem de dimensões bem menores. Outro aspecto claro nestas profundidades é que elas tem um aspecto mais

arredondado, o que se verifica pelo fator de forma fornecido pelo Quantkov.

Nas análises das figuras 10, 11 e 12, pode-se observar que as cavidades aparecem maiores e mais disformes. Isto torna-se mais claro quando se observa os valores numéricos dos diâmetros equivalentes e dos fatores de forma.

Outro aspecto que aparece mais claro nas profundidades maiores são pequenas cavidades em forma de veios. Este tipo de cavidade não é clara nas profundidades menores utilizando-se o aumento de 62,5 vezes e nem com 100 vezes.

Para $a_p=0,5$ mm, a seguir, mostra-se os dados medidos no analisador de imagem, relativos às cavidades na superfície, sua respectiva imagem (Fig. 7) e os respectivos parâmetros de corte utilizados.

$v_c = 240$ m/min; $f = 0,1$ mm/rev; $a_p = 0,5$ mm;
 Maior largura: $3,687 \times 10^{-1}$ mm;
 Diâmetro equivalente médio: $7,076 \times 10^{-2}$ mm;
 Fator de forma: 0,40;
 Área média das cavidades: $4,518 \times 10^{-3}$ mm²;
 Maior área: $1,632 \times 10^{-2}$ mm²;
 Percentual ocupado da área total da imagem: 8,45%.

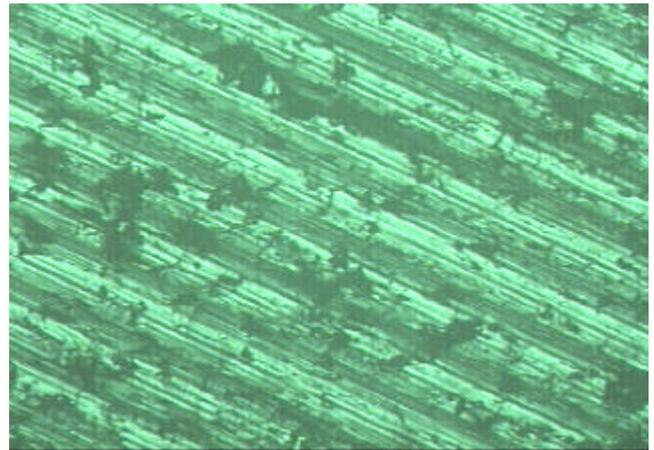


Figura 7. $v_c=240$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p=0,5$ mm

Para $a_p=1,0$ mm, a seguir, mostra-se os dados relativos às cavidades na superfície, sua respectiva imagem (Fig. 8) e os respectivos parâmetros de corte utilizados.

$v_c = 240$ m/min; $f = 0,1$ mm/rev; $a_p = 1,0$ mm;
 Maior largura: $3,003 \times 10^{-1}$ mm;
 Diâmetro equivalente médio: $8,788 \times 10^{-2}$ mm;
 Fator de forma: 0,45;
 Área média das cavidades: $6,532 \times 10^{-2}$ mm²;
 Maior área: $1,600 \times 10^{-2}$ mm²;
 Percentual ocupado da área total da imagem: 12,21%.

Nas figuras 7 e 8, as marcas de avanço da ferramenta ficam evidentes sobre a superfície usinada, assim como, pode-se observar as dimensões das cavidades.

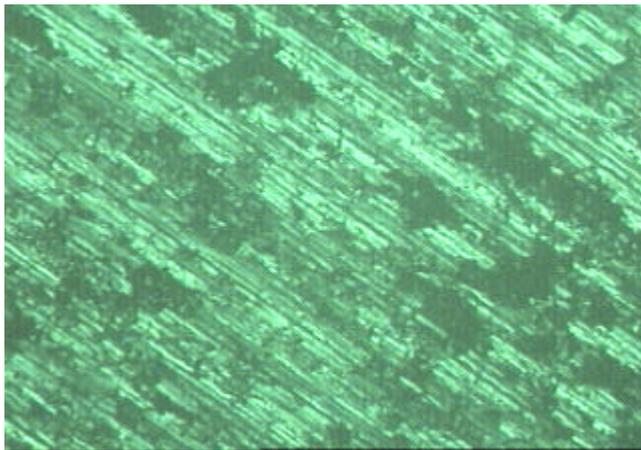


Figura 8. $v_c=240$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p=1,0$ mm

Para $a_p = 1,5$ mm, a seguir, mostra-se os dados relativos às cavidades na superfície, sua respectiva imagem (Fig. 9) e os respectivos parâmetros de corte utilizados.

$v_c = 240$ m/min; $f = 0,1$ mm/rev; $a_p = 1,5$ mm;
Maior largura: $2,289 \times 10^{-1}$ mm;
Diâmetro equivalente médio: $6,631 \times 10^{-2}$ mm;
Fator de forma: 0,36;
Área média das cavidades: $3,883 \times 10^{-3}$ mm²;
Maior área: $1,518 \times 10^{-2}$ mm²;
Percentual ocupado da área total da imagem: 10,05%.

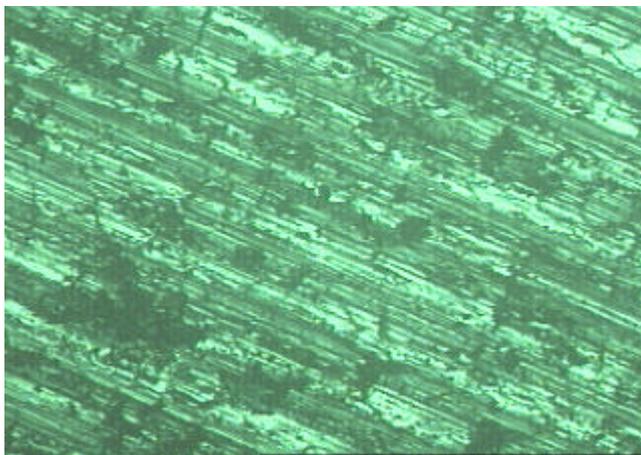


Figura 9. $v_c=240$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p=1,5$ mm

Para $a_p = 2,0$ mm, a seguir, mostra-se os dados relativos às cavidades na superfície, sua respectiva imagem (Fig. 10) e os respectivos parâmetros de corte utilizados.

$v_c = 240$ m/min; $f = 0,1$ mm/rev; $a_p = 2,0$ mm;
Diâmetro equivalente médio: $8,447 \times 10^{-2}$ mm;
Maior largura: $3,286 \times 10^{-1}$ mm;
Fator de forma: 0,33;
Área média das cavidades: $6,493 \times 10^{-3}$ mm²;

Maior área: $2,097 \times 10^{-2}$ mm²;
Percentual ocupado da área total da imagem: 18,68%.

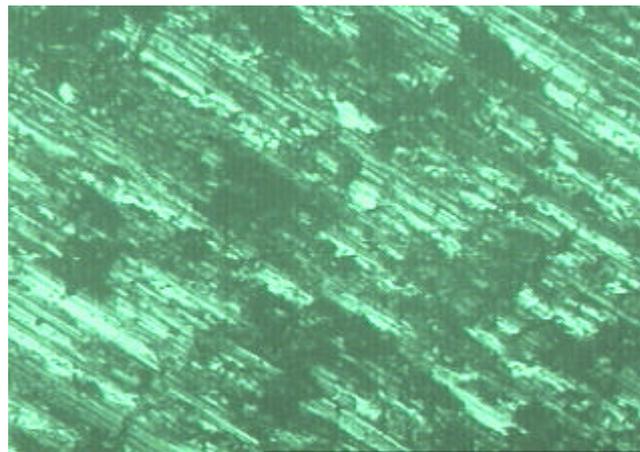


Figura 10. $v_c=240$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p=2,0$ mm

Para $a_p = 2,5$ mm, a seguir, mostra-se os dados relativos às cavidades na superfície, sua respectiva imagem (Fig. 11) e os respectivos parâmetros de corte utilizados.

$v_c = 240$ m/min; $f = 0,1$ mm/rev; $a_p = 2,5$ mm;
Diâmetro equivalente médio: $6,690 \times 10^{-2}$ mm;
Maior largura: $2,751 \times 10^{-1}$ mm²;
Fator de forma: 0,41;
Área média das cavidades: $4,139 \times 10^{-3}$ mm²;
Maior área: $1,664 \times 10^{-2}$ mm²;
Percentual ocupado da área total da imagem: 9,52%.

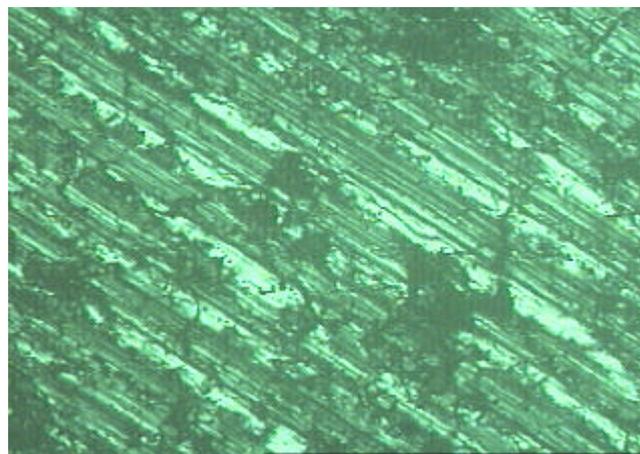


Figura 11. $v_c=240$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p=2,5$ mm

Para $a_p = 3,0$ mm, a seguir, mostra-se os dados relativos às cavidades na superfície, sua respectiva imagem (Fig. 12) e os respectivos parâmetros de corte utilizados.

$v_c = 240$ m/min; $f = 0,1$ mm/rev; $a_p = 3,0$ mm;
Diâmetro equivalente médio: $7,204 \times 10^{-2}$ mm;
Maior largura: $3,241 \times 10^{-1}$ mm;
Fator de forma: 0,34;
Área média das cavidades: $5,150 \times 10^{-3}$ mm²;
Maior área: $2,129 \times 10^{-2}$ mm²;

Percentual ocupado da área total da imagem:16,29%.

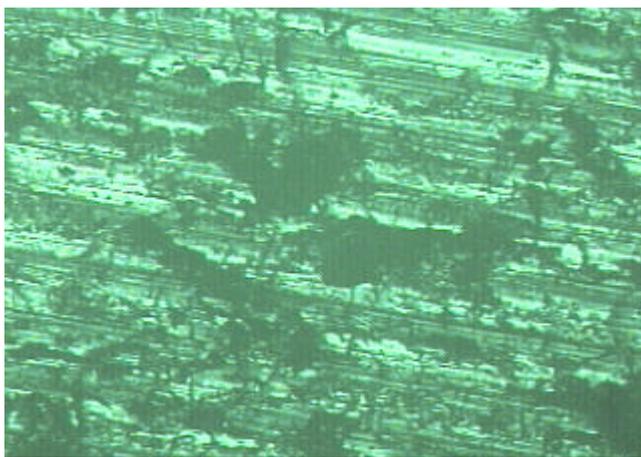


Figura 12. $v_c=240$ m/min; $f=0,1$ mm/rev; $a_p=3,0$ mm

Análises das figuras 8 a 12 evidenciam que as cavidades superficiais danificam a superfície usinada e isto pode ser observado nas figuras 4 a 6. Ou seja, os parâmetros de amplitude de rugosidade, são afetados com o surgimento destas cavidades.

Na figura 13, mostra-se o gráfico da área média que as cavidades tem em função da profundidade de corte empregado em cada passe. Está evidente que não houve um comportamento de crescimento nem decrescimento das áreas à medida que crescem as profundidades. Este fato foi ocasionado pelo aumento de cavidades na imagem à medida que cresce a profundidade de corte.

O aumento de cavidades na imagem se verificou da seguinte forma: poucos objetos com grande área mas muitos com pequena área.

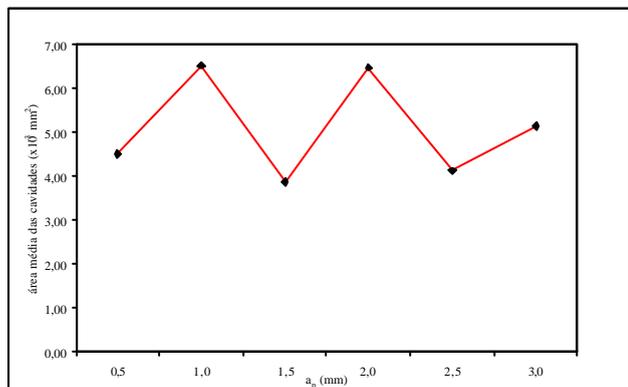


Figura 13. Gráfico de área média x a_p .

Na figura 14 mostra-se o percentual da área ocupada pelas cavidades em relação a área total da imagem. Observa-se uma ligeira tendência de crescimento com o aumento da profundidade de corte, porém isto não ocorre de forma uniforme. Estes aspectos podem até explicar o fato de que em faixas intermediárias de profundidade, os parâmetros de rugosidades passam por uma estabilização

ou até mesmo uma ligeira tendência de queda, sendo que apenas na profundidade de 2,00 mm há uma discordância.

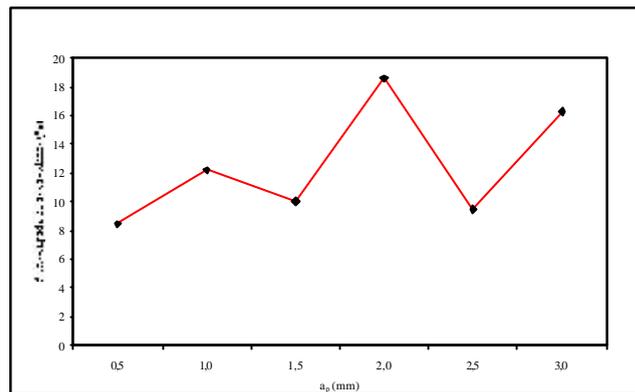


Figura 14. Percentagem de área ocupada pelas cavidades em relação a área da imagem x a_p .

Uma outra grandeza a ser analisada é a maior área das cavidades em cada imagem. A figura 15 mostra essas áreas em função da profundidade de corte.

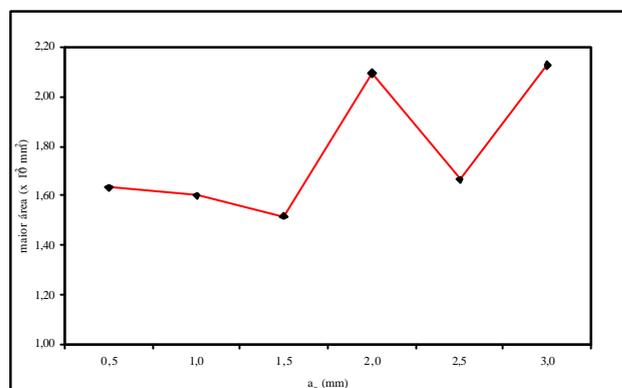


Figura 15. Maior área das cavidades em função da profundidade de corte.

Nota-se na figura 15 que a maior área de cavidades apresentou pequena variação nas três primeiras profundidades analisadas (0,5, 1,0 e 1,5 mm). Para as profundidades de corte de 2,0, 2,5 e 3,0 mm não foi observada nenhuma tendência

O que se verificou nestes experimentos, confirmou as expectativas de presença do *open grain* muito pouco abordados na literatura sobre este assunto. Em certas condições de corte, principalmente em condições mais extremas de profundidade, sua presença foi clara e significativa em relação a área observada das superfícies usinadas.

O aparecimento de cavidades na superfície de peças usinadas está relacionada à microestrutura do material [1]. O disco, cujo material é o ferro fundido cinzento, contém em sua estrutura uma matriz perlítica e lamelas de grafita. Pela ação da operação de corte, formam-se, no material em frente à ferramenta, micro-trincas na matriz, segundo

mecanismo descrito por Marwanga et al. [5]. Esta região à frente da ferramenta é denominada de Região Afetada pela Usinagem (Machining Affected Zone). Esta formação de micro-trincas favorece a formação de cavacos, sendo mais intensa em ferros fundidos com grafita lamelar (comparativamente a ferros fundidos nodulares ou aços). Entretanto, com o aumento da profundidade de corte e conseqüente aumento das forças de corte, é provável que estas micro-trincas aumentem de tamanho, o que resultaria em aumento da rugosidade da superfície após a operação do corte, fenômeno observado nos resultados experimentais.

Com o aumento da profundidade empregada no corte, aumenta-se a área de contato cavaco-ferramenta. Este aumento na área, provoca aumento no número de microtrincas que surgem na grafita fazendo com que a quantidade de material arrancado da superfície também aumente. O aumento da área de contato promove a elevação das componentes da força de usinagem: corte, avanço e passiva [6]. Acredita-se que as componentes de avanço e passiva, sejam mais influentes na nucleação e propagação da trinca através dos veios de grafita.

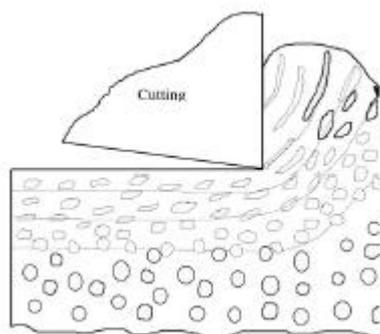


Figura 16. Diagrama esquemático da Zona Afetada pela Usinagem, em ferro fundido nodular [5].

Estes aspectos fazem com que certas precauções sejam tomadas durante a usinagem dos discos. A primeira seria observar com critério os parâmetros de corte empregados em operações de desbaste, principalmente com relação a profundidade de corte. Esta não deve ser baixa para não comprometer os tempos de usinagem nem tão altas que, devido a baixa qualidade da superfície gerada seja impossível de ser corrigida no acabamento.

Outra precaução, por outro lado, refere-se aos valores da profundidade de acabamento empregado. Se estes forem excessivamente baixos, podem não conseguir faixas de rugosidade requeridas no projeto do disco e necessários ao bom desempenho do sistema tribológico.

Para este trabalho fixou-se a velocidade e o avanço e permitiu-se apenas a profundidade como variável. Esta escolha se mostrou correta pelo fato de ficar nítida a variação das dimensões e aspectos das cavidades com o aumento da profundidade de corte. Também é claro o

vínculo dos parâmetros de topografia da superfície com a variação da profundidade.

CONCLUSÕES

Após as investigações realizadas, este trabalho permitiu chegar às seguintes conclusões:

1. Para a profundidade de corte de 0,5 mm, todos os parâmetros de rugosidade foram menores, comparados aos obtidos para as demais profundidades.
2. Os parâmetros de rugosidade correspondentes a profundidades de corte a partir de 1,0 mm apresentaram-se dentro de uma mesma faixa de valores.
3. A análise da área média, da porcentagem das cavidades não seguiu nenhuma tendência com o aumento da profundidade de corte.

REFERÊNCIAS

- [1] BCIRA Journal, v.13, 1965, nº 6.
- [2] ISO 3685, 1977, Tool-life Testing with Single-point Turning Tools", ISO - International Organisation for Standardization.
- [3] TRENT, E.M., 1991, "Metal Cutting", 3rd Edition, Butterworths-Heinemann Ltd, 273 pg., ISBN 07506-1068-9.
- [4] MACHADO, A. R. e SILVA, M.B., 1999, "Usinagem dos Metais", Universidade Federal de Uberlândia, 4ª edição, Abril 1999.
- [5] MARWANGA, R.O. et al. Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons. AFS Transactions, 2000, p.651.
- [6] FERRARESI, D. 1977, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Editora Edgard Blücher Ltda, Vol 1, São Paulo, Brasil, 751 pgs.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Tupy Fundições e Sandvik Coromant pela disponibilização dos discos de freio e das ferramentas de corte, respectivamente.