

INFLUÊNCIA DA FRIABILIDADE DOS GRÃOS CBN GS E GL NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO FERRO FUNDIDO NODULAR

José Claudio Lopes, jclaudio.lopes@hotmail.com¹
Lucas de Martini Fernandes, lucas-asewas@hotmail.com¹
Roberta Silveira Volpato, roberta_sv@hotmail.com¹
Rodolfo Fischer Moreira de Oliveira, rodolfo.oliveira@saint-gobain.com²
Hamilton José de Mello, hamilton@feb.unesp.br¹
Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br³
Rosemar Batista da Silva, rosemar.silva@ufu.br⁴
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

²Saint-Gobain do Brasil Produtos Industriais e para Construção Ltda. - Divisão Materiais Cerâmicos.

³Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

⁴Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, FEMEC/UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, MG, Brasil.

Resumo. Em meio as constantes aplicações do mercado e sempre impulsionado pelo dinamismo em obter novas tecnologias, a utilização do ferro fundido nodular tem aumentado em taxas consideráveis nas últimas décadas, impulsionado pelas suas aplicações de âmbito industrial e novas propriedades descobertas, suas atribuições referem-se à substituição de materiais cujo seus processamentos demandam maior custo de fabricação. Exemplo disso ressalta-se o aumento gradativo da utilização desse material para concepção de eixos virabrequins e eixos de comando de válvula, já presentes atualmente nos motores de veículos populares fabricados pelas maiores empresas do ramo no país, aplicação em braços de suspensão, como feito pelo grupo francês PSA (Peugeot-Citroen), excelente resultados ao utilizar em coletores de escape e em turbo compressores fabricados pela canadense Wescast Industries Inc., além de outras plausíveis aplicações como engrenagens e suportes para freios. As várias aplicabilidades atribuídas a esse material devem-se a versatilidade em relação às propriedades mecânicas, sem adição de elementos de liga, sendo possível extrair bons resultados apenas com tratamentos térmicos simples; e devido sua alta fluidez, consegue-se peças muito próximas às dimensões e formatos finais, sendo necessárias operações de usinagem de ordem de acabamento, mais especificadamente àquelas que dizem respeito à retificação. Atribui-se a este estudo analisar os efeitos da retificação do ferro fundido nodular FE7000-2 (dureza média de 235-310 HB) utilizando dois tipos de rebolos de CBN, tendo apenas como distinção a acentuada diferença de friabilidade dos grãos abrasivos, constituídos de ligante vitrificado e ambos com mesma dureza, assim, tende-se que será analisado o desempenho de cada rebolo levando em conta os resultados de rugosidade, emissão acústica, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microscopia óptica da superfície retificada e microdureza. As retificações dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia - UNESP - campus Bauru, e todas as análises que se sucederão serão feitas no mesmo laboratório.

Palavras chave: Retificação, CBN, Friabilidade, Ferro Fundido Nodular.

1. INTRODUÇÃO

Retificação é um processo de usinagem que emprega um rebolo a elevada velocidade para remover material de outro material mais macio. (Marinescu *et al.* 2007). É também um dos mais importantes processos de fabricação, especialmente quando são necessárias superfícies de alta qualidade geométrica, dimensional e superficial ou se materiais frágeis precisam ser usinados (Denkena *et al.* 2015), sendo geralmente uma das operações finais pela qual a peça passa.

O processo de retificação para dar forma aos materiais é provavelmente o mais antigo da existência, datando do período que o homem pré-histórico descobriu que ele poderia afiar suas ferramentas esfregando-as contra pedras com muitos grãos (pontas). Sem a capacidade de dar forma e afiar, implementadas pela retificação, possivelmente, estaríamos vivendo na Idade da Pedra (Malkin *et al.* 2008). No caso da retificação a ferramenta utilizada é chamada de rebolo. O rebolo é formado por grãos abrasivos, ligantes com porosidades para alojar os cavacos gerados no processo; seu condicionamento, isto é, seu balanceamento e dressagem (afiação) são feitos antes da operação de retificação e tem considerável importância que o resultado final do processo depende em grande parte de como este foi feito (Inasaki *et al.* 1999).

Segundo Sosa *et al.* (2015), quando formatos precisos são desejados, processos de usinagem de alta precisão, como a retificação, são usados. Ainda segundo o mesmo autor, o ferro fundido nodular é utilizado em algumas peças nas quais exigências mecânicas e confiabilidade são atributos cruciais. Peças automotivas (virabrequins, partes de suspensão) e vários componentes de máquinas industriais podem ser citados como exemplo.

A fim de se conhecer melhor os fenômenos que ocorrem devido à friabilidade dos grãos abrasivos GS e GL, foi estabelecida uma parceria entre a FEB/UNESP - Bauru e a empresa Saint-Gobain Materiais Cerâmicos Surface Conditioning, pessoa do Engenheiro Rodolfo Fischer Moreira de Oliveira, está nos proporcionando, cedendo os rebolos confeccionados pela empresa NIKKON, que visa possibilidade de avaliação, com maior profundidade, as variáveis que são amplamente utilizadas na indústria metal-mecânica como rugosidade, desgaste do rebolo, dentre outras.

A importância deste trabalho está na análise comparativa entre os rebolos, destacando suas vantagens e desvantagens e melhores aplicações com base nos resultados obtidos. Assim como afirma Denkena *et al.* (2016), a escolha correta do rebolo determina o sucesso da operação de retificação, sendo que as propriedades do rebolo influenciam não somente na produtividade, como também na qualidade da peça que é possível se obter.

Na prática, as propriedades importantes do grão abrasivo incluem sua dureza, resistência à abrasão, estrutura cristalina, forma e tamanho, os quais afetam a friabilidade e a durabilidade do abrasivo (Stephenson *et al.* 2006). A friabilidade é uma característica importante do abrasivo, pois está relacionada à habilidade do grão se quebrar em pedaços menores. Alta friabilidade indica baixa resistência à fratura (Youssef *et al.* 2008).

Um grão com boa tenacidade (o oposto de friabilidade) consegue resistir ao desgaste e às altas pressões de corte, mas podem resultar em excessiva geração de calor e eventualmente danos ao rebolo ou à superfície da peça. Por outro lado, grãos muito friáveis tendem a se desgastar muito rapidamente. Portanto, o ideal seria usar grãos suficientemente tenazes de modo que não sejam muito friáveis (Stephenson *et al.* 2006).

O rebolo de CBN com liga vitrificada é uma das mais promissoras ferramentas abrasivas devido a seu excelente desempenho na retificação, como altas taxas de remoção, alta resistência ao calor, boa auto afiação, fácil dressagem, longa vida do rebolo e baixo custo total. Ele tem sido amplamente utilizado em vários tipos de operações de retificação para materiais metálicos como aço, ferro fundido e superligas, indo desde retificação com alta eficiência até retificação com alta precisão. Em comparação a rebolos de CBN de ligas metálicas e resinóides, rebolos de CBN de liga vitrificada apresentam maior dureza por parte da liga e uma capacidade de auto-dressagem significativamente maior. Além disso, um certo número de poros com diferentes tamanhos pode ser introduzido nos rebolos de ligas vitrificadas.

1.1. Rebolo CBN

Segundo Linke (2016), a invenção do superabrasivo nitreto cúbico de boro (CBN) está diretamente ligada à síntese do diamante artificial. O CBN tem a mesma estrutura cristalina que o diamante, mas no lugar de átomos de carbono existem átomos de nitrogênio e de boro.

Segundo Guo *et al.* (2008), a retificação com rebolos de CBN vem sendo utilizada cada vez mais na indústria aeroespacial. Tais rebolos podem proporcionar temperaturas mais baixas no processo, resultando em uma menor tendência de danos térmicos, indesejadas tensões residuais e camada de queima branca.

De acordo com Cai *et al.* (2004), rebolos de CBN costumam ser muito mais caros do que os convencionais, porém a justificativa para utilizá-los está não apenas nos benefícios de uma melhor qualidade e exatidão, mas também nos menores custos do processo devido ao seu potencial de alcançar altas velocidades de corte, maiores intervalos de dressagem e elevadas taxas de remoção de material, o que deve mais do que compensar o custo inicial mais elevado do rebolo e o maior tempo necessário de dressagem. No entanto, o empastamento do rebolo (sobretudo de materiais dúcteis) cria a necessidade de uma profundidade de dressagem relativamente grande e de dressagens mais frequentes para poder manter limpa a superfície do rebolo. Portanto, é importante que se evite o empastamento do rebolo para que se possa aumentar o seu intervalo de tempo de dressagem.

Devido à sua elevada dureza e resistências térmica e química, o CBN é perfeitamente apropriado para processos de abrasão de elevado desempenho. Comparativamente à abrasivos convencionais, o CBN tem um desgaste mínimo e, portanto, sua capacidade de corte é mantida por um maior período de tempo. Um único grão de CBN irá exibir uma vida centenas de vezes maior que grão convencional. Ainda, graças à sua afiação inerente, o CBN tende a resfriar o processo e gerar melhores integridade superficial e acabamento (Kopac *et al.*, 2003)..

Wang (2008) afirma que apesar da retificação de eixos de comando de válvulas ter sido um dos maiores motivos para a troca dos rebolos convencionais pelo de CBN, existem muitas outras aplicações para este tipo de abrasivo na indústria, como por exemplo aplicações em munhão de mancais, munhão de virabrequim, válvulas, assento de válvulas, balancins, eixos, superfícies de encosto, tuchos, cames, ressalto, agulhas de injetor de combustível, bicos, mancais de turboalimentadores, roletes de excêntricos, anéis de pistão, rotores, palhetas, pinos, válvulas para direção hidráulica e ar condicionado, bomba de ar, bomba de óleo, faces de apoio, transmissões automáticas, culatra, anéis de rolamentos, pistas internas e externas para juntas universais e homocinética, válvulas de transmissão e corpos de válvulas, os quais são observados tanto na Europa quanto na América.

1.2. Friabilidade dos grãos abrasivos

O conceito de friabilidade corresponde à facilidade do objeto (no caso o grão abrasivo) se quebrar em pedaços menores sob uma determinada força ou impacto (Nussbaum, 1988). Assim, Jackson *et al.* (2011) afirmam que enquanto a dureza fornece uma medida para a tendência do grão se desgastar por atrito na escala atômica, a tenacidade à fratura fornece uma medida para a perda de abrasivo devido a separação por fratura do ligante, ou lascamento do grão tipicamente na escala micrométrica (micro-fratura) ou maior (macro-fratura).

Os mesmos autores ainda afirmam que o grau da fratura é fortemente dependente das propriedades do grão, como tamanho e morfologia do cristal, impurezas, inclusões, trincas pré-existentes e formato. É também muito dependente do nível e da natureza das forças aplicadas ao grão durante a retificação e de fatores do ambiente do processo, tal como choque térmico devido ao fluido de corte.

Segundo Alves (2005), o comportamento do processo de retificação está relacionado com o grau de friabilidade do grão abrasivo, pois, quanto maior a friabilidade, menor é a energia consumida e melhor é a rugosidade superficial da peça, uma vez que o rebolo permanece se afiando continuamente.

Por um lado, os grãos abrasivos que são muito tenazes para uma determinada aplicação perderão seu gume de corte mais rapidamente e se terá mais atrito, o que leva a danos térmicos desnecessários no material da peça e tem o perigo de ocorrer vibrações. Por outro lado, grãos muito friáveis se desgastarão rapidamente resultando em uma vida curta da ferramenta e possíveis erros de forma da peça final. Assim, o ideal é que os grãos tenham um comportamento de fratura controlado de maneira que eles regenerem a afiação das arestas de corte e a ferramenta trabalhe no modo de auto-afiação. (Linke, 2016).

Segundo Malkin & Guo (2008), grãos abrasivos duros e friáveis são geralmente aplicados na retificação de precisão enquanto grãos tenazes e maiores são mais adequados para operações como o desbaste.

1.3. Ferro Fundido Nodular

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, não só devido às características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de, mediante introdução de elementos de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular, ter sido viável seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços. (Chiaverini, 2008).

Segundo Guesser (2009), nos ferros fundidos com grafita, a microestrutura configura-se numa matriz de maneira semelhante aos aços (ferrita, perlita, martensita, entre outros) e possui também partículas de grafita. A grafita apresenta resistência mecânica muito baixa (Goodrich, 2003) e a sua presença pode ser considerada como uma descontinuidade da matriz, tendo um efeito de concentrador de tensões. A forma na qual a grafita se apresenta tem então um grande efeito sobre as propriedades mecânicas do material. Por exemplo, a forma esférica resulta em um menor efeito de concentração de tensões, enquanto as formas mais agudas (conhecidas por grafitas em veios) possuem elevada concentração de tensões (Kohout, 2001). O ferro fundido nodular é mais resistente e muito mais dúctil do que os ferros fundidos cinzentos, apresentando características mecânicas que se aproximam do aço (Callister, 2008).

Tendo em vista o fato de que peças de ferro fundido nodular podem conseguir formatos e dimensões muito próximas às finais, as operações de usinagem realizadas são normalmente de acabamento, sendo necessário, por exemplo, um uso 80% menor de energia na fabricação de uma peça de ferro fundido nodular quando comparado a uma de aço forjado. (Sosa *et al.* 2015).

Com a utilização do ferro fundido nodular, pode-se fazer peças mais complexas do que se fosse utilizado um aço de baixo teor de carbono visto que o ferro fundido nodular possui maior fluidez em estado líquido e menor contração no resfriamento. Além disso, quando comparado a um aço de baixo teor de carbono, o ferro fundido nodular apresenta melhor amortecimento de vibrações, resistência ao impacto e resistência ao desgaste (Taborga *et al.*, 2003).

De acordo com Feres (2010), a substituição do aço carbono pelo ferro fundido nodular pode ser uma excelente alternativa para empresas que desejam obter menor custo de fabricação, produção de um maior número de peças por hora e com menor consumo de ferramentas. Assim, uma das principais razões que motiva a maioria das empresas a substituir o aço carbono pelo ferro fundido nodular é a redução de custos no processo de usinagem, os quais podem ser de até 50% pela utilização deste material.

O ferro fundido nodular apresenta ainda uma melhor relação resistência/peso em comparação ao aço de baixo carbono. Isso possibilita na maioria das vezes que uma peça fabricada de ferro fundido nodular substitua a fabricada de aço, suportando a mesma carga que desta última e apresentando uma redução no peso (Labrecque & Gagné, 1998).

Em relação à usinabilidade do ferro fundido, Guesser (2009) diz que os ferros fundidos em geral apresentam alta usinabilidade, sendo que no caso dos ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular, a presença da grafita em torno de 11-12% auxilia na quebra do cavaco, evitando em parte a aderência de cavaco à ferramenta. Ainda segundo o mesmo autor, há, entretanto, diferenças significativas na usinabilidade dos ferros fundidos dependendo da microestrutura, visto que os microconstituintes dos ferros fundidos possuem diferenças importantes de propriedades, dentre as quais a dureza, sendo que a usinagem dos ferros fundidos nodulares austemperados e vermiculares apresentam dificuldades e características particulares.

Ressaltando o aumento da aplicabilidade do ferro fundido nodular como constituinte de várias peças, sendo de viável adequação e fabricação e tendo o teor de exclusividade do trabalho, tem-se um campo de larga importância em fundamentar parâmetros para a retificação deste material, uma vez que a aplicação de diferentes rebolos de CBN com friabilidades distintas faz com que este trabalho tenha o objetivo de entender o melhor tipo de processamento deste material, que impacte em uma melhor viabilidade econômica e logo seja atribuída uma melhor qualidade nos parâmetros necessários para cada aplicação no mercado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, os rebolos foram confeccionados com grãos com diferentes friabilidades com a finalidade de comparar suas propriedades e analisar as vantagens e desvantagens de cada um para aplicação em escala industrial a fim de relacionar suas características com as formas obtidas na geometria final na peça.

Os ensaios foram sob três velocidades de mergulho, cada qual constituindo maior avanço da ferramenta com relação à superfície da peça e logo tendo como consequência uma maior taxa de remoção de material, todos os dados obtidos serão em relação à lubri-refrigeração abundante. A fim de uma maior confiabilidade estatística, os procedimentos serão realizados três vezes para cada velocidade de mergulho, tendo assim um total de dezoito amostras a serem estudadas.

Em suma, afirma-se que mediante os procedimentos citados, tem-se que as variáveis de saída serão os resultados de rugosidade superficial, da emissão acústica, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microscopia óptica da superfície retificada e microdureza, sendo aqui destacados a rugosidade superficial e o desgaste diametral do rebolo.

Os parâmetros de entrada podem ser vistos na Tabela 1:

Tabela 1. Parâmetros de entrada

Condições experimentais	Valores
Velocidades de mergulho (v_f):	0,5 ; 1,0 ; 1,5 mm/min
Rotação da peça (n_w):	81 rpm
Velocidade periférica da peça (v_w):	0.39 m/s (inicial) 0.27 m/s (final)
Velocidade de corte (v_s):	32 m/s
Tempo de <i>spark-out</i> :	8 segundos
Profundidade de dressagem:	80 μ m (2 μ m/passe)
Profundidade de corte (a):	0,1 mm
Largura de retificação (b):	4 mm
Vazão do fluido de corte:	17 L/min

Com base na apostila “Tecnologia Avançada em Processo de Retificação” da Universidade de Vendas Saint-Gobain Abrasivos (Univen) foram calculados alguns parâmetros e utilizando a equação que coloca a variável q_s , a qual indica a relação de velocidade rebolo e peça, em função de outras variáveis conhecidas e a informação que em geral um valor de q_s entre 90 e 120 indica uma operação de acabamento, foram feitos os cálculos e foi obtido um valor de 118 para a relação, indicando que o processo realizado neste trabalho, independentemente da velocidade de avanço utilizado, está relacionado a um processo de acabamento. A equação dita anteriormente pode ser vista em (1):

$$q_s = \frac{V_C}{V_W} = \frac{n_s \cdot d_s}{n_w \cdot d_w} \quad (1)$$

Sendo que V_C = velocidade do rebolo [m/s]; V_W = velocidade da peça [m/s]; n_s = rotação do rebolo [rpm]; d_s = diâmetro do rebolo [mm]; n_w = rotação da peça [rpm]; d_w = diâmetro da peça [mm].

Desta maneira, foi escolhido utilizar um diâmetro final de 64 mm para o diâmetro final da peça e com isso foi possível obter o valor da velocidade periférica final da peça e em seguida, para foi obtido o tempo de uma rotação da peça para se obter o tempo de centelhamento a ser utilizado, visto que o recomendado na apostila “Tecnologia Avançada em Processo de Retificação” é de 10 a 20 rotações da peça. Levando em consideração essas informações, foi utilizado um tempo de centelhamento de 8 segundos.

No total foram então removidos 28 mm de material no diâmetro da peça (no total 280 passes durante o processo de retificação, removendo 100 μ m de material no diâmetro por passe).

2.1. Metodologia experimental

Os experimentos serão realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP 515 H, equipada com comando numérico computadorizado CNC da marca Fagor.

2.1.1. Rebolos utilizados

Serão utilizados dois rebolos: CBN-GS (nomenclatura SNB151.GS Q12 VR2) e CBN-GL (nomenclatura SNB151.GL Q12 VR2), ambos de ligante vitrificado do tipo 14A1, com dimensões de 350 mm (diâmetro externo) x 19 mm (largura) x 5 mm (camada), diâmetro interno de 127 mm, dureza da liga R, concentração 300 e granulometria entre 100 e 120 mesh classificado como granulometria fina da empresa Nikkon Ferramentas de Corte Ltda, cujos grãos abrasivos foram cedidos pelo grupo Saint-Gobain Materiais Cerâmicos – Surface Conditioning. As condições de dressagem serão mantidas constantes utilizando dressador conglomerado de dimensões 15 x 8 x 10 mm, da empresa Master Diamond Ltda. As operações de dressagem serão realizadas com lubri-refrigeração convencional. Esse tipo de dressador foi escolhido para uniformizar a superfície de corte do reboło para o início de um novo ensaio.

Os grãos abrasivos do reboło CBN GS são cristais pretos de formato irregular, designados em geral para baixas forças de corte e aplicações de retificação onde versatilidade, baixo custo e um corte fácil são o mais importante. Já os grãos do reboło CBN-GL são cristais muito tenazes, angulados, afiados e de coloração âmbar, sendo a escolha ideal para se conseguir grande quantidade de remoção de material em situações que apresentam elevadas forças de corte e a peça final necessita apresentar um bom acabamento superficial. Uma imagem dos grãos abrasivos pode ser vista na Figura 1.

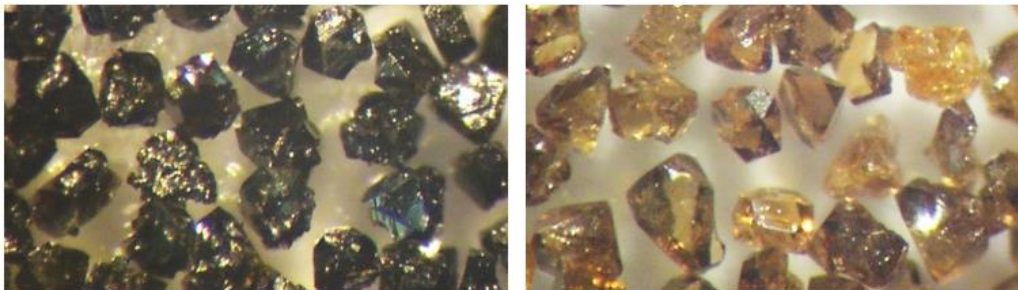


Figura 1. Grãos abrasivos dos rebolos CBN GS (à esquerda) e do reboło CBN GL (à direita).

2.1.2. Sistema de refrigeração convencional ou abundante

O sistema de refrigeração convencional utilizado é o mesmo utilizado em várias empresas atualmente. Consiste essencialmente no reservatório de fluido, bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido de corte. O reservatório da retificadora possui capacidade de 80 litros. O fluido de corte utilizado será uma emulsão de 2,5 % em água do óleo solúvel semi-sintético QUIMATIC ME-I concentrado, fornecido pela empresa Quimatic Tapmatic do Brasil. O fluido de corte usado possui na sua composição, anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocitivos não iônicos, alcanolomidas, entre outros. Serão utilizados dois bocais difusores do tipo fixoflex, também da empresa Quimatic, com furos de Ø 6,35 mm. O fluido de corte será aplicado a uma vazão de 17 L/min e pressão de 0,4 Mpa.

2.1.3. Corpos de prova

A fim de obter resultados que possam ser aplicados largamente no setor industrial e que possam ser atribuídos de maneira economicamente viável, tem-se que este estudo visa relacionar a aplicação do processo de retificação a corpos de prova feitos de ferro fundido nodular FE7000-2 (GGG 70), adquiridos da empresa METALRENS, apresentam dureza 235-310 HB e possuem o formato de anel, sendo suas dimensões de $92 \pm 0,1$ mm de diâmetro externo, $30 \pm 0,1$ mm de diâmetro interno e espessura de $5 \pm 0,1$ mm.

2.1.3. Rugosidade Média

A medição da rugosidade é um dos pontos essenciais do trabalho pois além de ser um parâmetro essencial na retificação, visto que independentemente do componente que será produzido, pequenas tolerâncias dimensionais e alta qualidade superficial geralmente são aspectos dominantes do processo, esse também é um dos parâmetros que permite a comparação da eficiência de cada reboło sob diferentes velocidades de avanço na remoção de material do ferro fundido nodular, podendo sua análise ser estendida a outros tipos de materiais.

A medição da rugosidade foi feita com um rugosímetro Surtronic³⁺, da marca Taylor Hobson.

Para a medição da rugosidade, primeiramente o rugosímetro foi montado sobre uma mesa de apoio rígida e plana para que não houvesse interferência da vibração da mesa durante o movimento de avanço e retorno do apalpador para realizar a medição, buscando se obter valores os mais precisos possíveis.

A análise deste parâmetro é de extrema importância, visto que, assim como afirmam Silva *et al.* (2013), é bem sabido que o acabamento superficial pode afetar significativamente a resistência dos componentes quando eles estão submetidos a ciclos de fadiga e o acabamento superficial das peças está diretamente ligado às propriedades do material, como: coeficiente de atrito, abrasão, lubrificação, condutividade térmica, resistência mecânica, entre outros.

2.1.5. Desgaste Diametral do Rebolo e Relação G

O desgaste será medido por meio do método da impressão do perfil do rebolo desgastado em um cilindro de aço ABNT 1045. O método consiste na retificação do cilindro, removendo um certo volume de material. Feito isso, a variação de profundidade existente entre as regiões desgastadas e não desgastadas do rebolo foi repassada ao corpo retificado, que foi então medido por meio do mesmo rugosímetro utilizado na avaliação da rugosidade do corpo de prova e o perfil gerado foi obtido no computador com auxílio do Software Taylor Hobson TalyMap. Em posse desses dados, foi também possível obter a relação G.

Como houve um desgaste do rebolo na faixa usinada com consequente redução de seu diâmetro em relação à faixa não usinada, o cilindro no qual foi impresso o perfil do rebolo apresenta maior diâmetro nas faixas desgastadas do rebolo e menor diâmetro nas faixas em que o rebolo não sofreu desgaste.

Para realizar a medição do desgaste do rebolo, o rugosímetro foi posicionado sobre o cilindro e no computador utilizou-se o Software Taylor Hobson TalyMap para poder visualizar o perfil de desgaste do rebolo, o qual foi obtido e enviado pelo rugosímetro através do cabo de transmissão de dados que conectava o equipamento com a CPU.

Após obtido o perfil, foi utilizada uma ferramenta do programa que permite medir a diferença de profundidade de dois pontos gerados no perfil para se conseguir o valor do quanto o rebolo desgastou neste sentido e cada valor obtido foi anotado. Para tentar se obter o valor mais próximo do real, foram utilizados os valores médios de cada trecho.

A partir dos dados de desgaste diametral do rebolo, foi possível calcular o valor da relação G para cada caso, parâmetro o qual é muito utilizado para se obter a eficiência da ferramenta e é o mais importante para descrever quantitativamente o comportamento do rebolo em relação à taxa de remoção de material e ao seu desgaste (Kuffa et al. 2016). Tendo o volume de material removido e a espessura do corpo de prova constantes em todos os ensaios e considerando sempre o diâmetro inicial do rebolo igual a aproximadamente 350 mm, que é uma aproximação razoável, é possível obter a relação G por:

$$G = \frac{V_w}{V_s} = \frac{\frac{(\pi D_w^2 - \pi d_w^2) \cdot t}{4}}{\frac{(\pi D_r^2 - \pi d_r^2) \cdot t}{4}} = \frac{(92^2 - 64^2)}{(350^2 - d_r^2)} \quad (2)$$

Sendo V_w o volume de material removido, V_s o volume de rebolo desgastado, D_w o diâmetro inicial da peça, d_w o diâmetro final da peça, D_r o diâmetro inicial do rebolo, d_r o diâmetro final do rebolo e t a espessura da peça. Substituindo o valor de d_r no último termo da expressão apresentada acima, obtém-se para cada condição o valor da relação G.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos das medições feitas após os ensaios para cada velocidade de avanço utilizada de cada rebolo, assim como gráficos para auxiliar na comparação e entendimento do processo. Juntamente à apresentação dos dados, serão analisados os ocorridos em cada caso.

3.1 Rugosidade

Segundo Rowe (2014), a rugosidade é influenciada por diversos aspectos, entre eles: tamanho e espaçamento entres os grãos abrasivos, modo de dressagem do rebolo, tempo de centalhamento, sistema de lubri-refrigeração utilizado, entre outros aspectos, sendo que neste trabalho todos os parâmetros citados e outros relacionados foram mantidos iguais entre os dois rebolos, sendo a velocidade de mergulho e o tipo de grão, com destaque à diferença de friabilidade entre eles, os únicos parâmetros variáveis. Dessa maneira, os valores de rugosidade obtidos serão analisados em função destas características.

Os valores de rugosidade média obtidos de cada rebolo para cada velocidade de avanço estão dispostos na Figura 2. Assim, a coluna azul na velocidade de avanço 0,5 mm/min corresponde à média dos 3 valores de rugosidade média obtida das amostras usinadas com o rebolo CBN GS e juntamente a este, ainda na mesma velocidade de avanço, está a coluna vermelha referente à média dos 3 valores de rugosidade média obtidos dos corpos de prova usinados com o rebolo CBN GL.

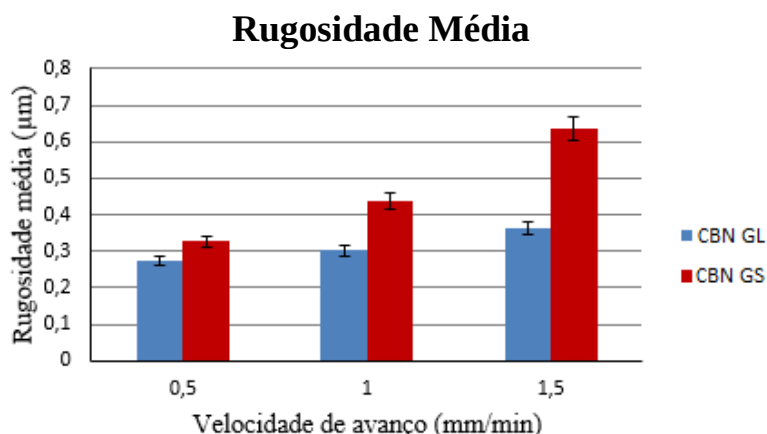


Figura 2. Valores médios de rugosidade média para cada condição de usinagem para ambos os rebolos.

Da Figura 2, foi possível observar que para uma mesma velocidade de avanço o rebolo CBN GL apresentou menores valores de rugosidade em todas as condições. Analisando as variações em ambos os rebolos causada pelo aumento da velocidade de avanço, foi possível observar uma tendência de que conforme se aumenta a velocidade de avanço, mais elevada é a rugosidade superficial.

Em seu trabalho, Taborga *et al.* (2003) fizeram uma análise semelhante de rugosidade superficial em função da velocidade de mergulho utilizada, porém utilizando rebolos de carboneto de silício e óxido de alumínio. Os autores chegaram a um resultado semelhante com o obtido nesta pesquisa de que com a elevação da velocidade de mergulho e redução da velocidade de corte, a rugosidade aumenta. A explicação dos autores para este fenômeno foi de que com o aumento da velocidade de mergulho, e consequente aumento da espessura de cavaco não-deformado devido ao aumento da penetração por revolução na peça, faz com que a rugosidade seja mais elevada.

Foi possível também notar um padrão nas diferenças de rugosidades entre cada rebolo conforme se aumentou a velocidade de avanço: a diferença obtida de rugosidade média das amostras entre cada rebolo foi mais elevada conforme se aumentou a velocidade de avanço. A Tabela 2 apresenta uma ilustração do que foi dito:

Tabela 2. Diferença dos valores de rugosidade média entre cada rebolo para cada velocidade de avanço.

V_f Rebolo	0,5 mm/min	1,0 mm/min	1,5 mm/min
CBN GL	0,274 µm	0,303 µm	0,364 µm
CBN GS	0,327 µm	0,438 µm	0,64 µm
Diferença	0,053 µm	0,135 µm	0,276 µm

Dessa maneira, relativamente à rugosidade média, pode-se observar que para maiores velocidades de avanço, o rebolo CBN GL apresenta menos variações no resultado do que o CBN GS. Levando em conta a análise sob o ponto de vista deste parâmetro apenas, o rebolo CBN GS trabalha melhor em menores velocidades de avanço, ou, sob menores esforços de corte.

Destas informações e da análise dos rebolos, chegou-se à conclusão que o motivo de tamanha diferença nos resultados está intrinsicamente ligado à diferença de friabilidade dos grãos abrasivos. O rebolo CBN GL por ter grãos abrasivos mais tenazes, apresenta um menor desgaste total da ferramenta (como será visto mais adiante na seção 3.2) e, consequentemente, um desgaste mais regular dos grãos abrasivos ao longo de seu comprimento. Justamente por essa característica, o rebolo CBN GL consegue resistir a maiores velocidades de avanço e esforços de corte sem apresentar um desgaste ferramental elevado, sendo capaz de produzir superfícies regulares nos corpos de prova usinados nas condições testadas. Já o rebolo CBN GS, por ser bastante friável, apresentou um desgaste mais elevado e resultou em uma distribuição mais irregular dos grãos abrasivos ao longo de seu comprimento, ocasionando uma rugosidade média mais elevada comparativamente ao outro rebolo. Assim, devido a alta friabilidade deste rebolo, conforme se aumentava a velocidade de avanço, maior era o seu desgaste, resultando numa elevação ainda mais acentuada da rugosidade média.

3.2 Desgaste Diametral do Rebolo e Relação G

As médias dos dados de desgaste diametral do rebolo obtidos para cada condição estão dispostos na Figura 3:

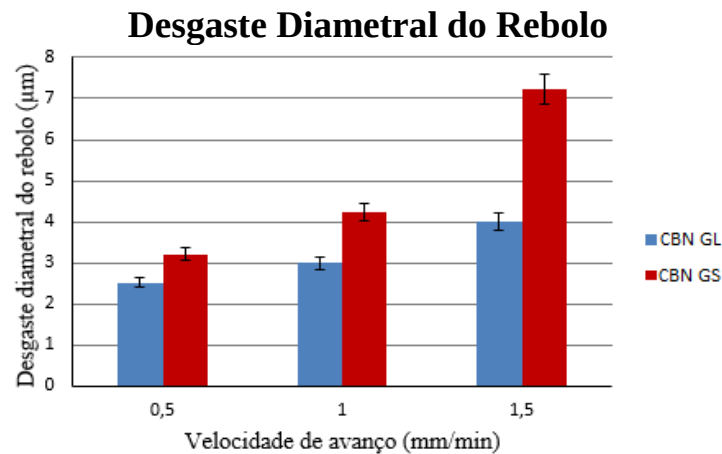


Figura 3. Valores médios de desgaste diametral do rebolo em função das velocidades de avanço em cada caso.

Analisando a Figura 3, pode-se notar que o rebolo CBN GL apresentou um desgaste diametral consideravelmente menor que o CBN GS para todas as velocidades de avanço utilizadas.

Quanto à resposta dos valores de desgaste diametral dos rebolos para a variação da velocidade de avanço, é possível observar no caso do rebolo CBN GL que a resposta se manteve aproximadamente estável e a variação não foi tão elevada quanto no caso do CBN GS, o qual por sua vez apresentou uma variação do desgaste diametral de aproximadamente 1 µm na mudança da velocidade de avanço de 0,5 para 1,0 mm/min, enquanto na mudança da velocidade de 1,0 para 1,5 mm/min a variação do desgaste foi bastante acentuada, tendo uma diferença de aproximadamente 3,02 µm (visto que para 1,0 mm/min o desgaste foi de 4,22 µm e para 1,5 mm/min o desgaste foi de 7,24 µm), podendo se supor neste caso uma curva aproximadamente exponencial para a resposta do rebolo ao aumento da velocidade de avanço.

Quanto à relação G, utilizando os valores de desgaste diametral do rebolo obtidos e a expressão dada por (2), é possível plotar o gráfico apresentado na Figura 4:

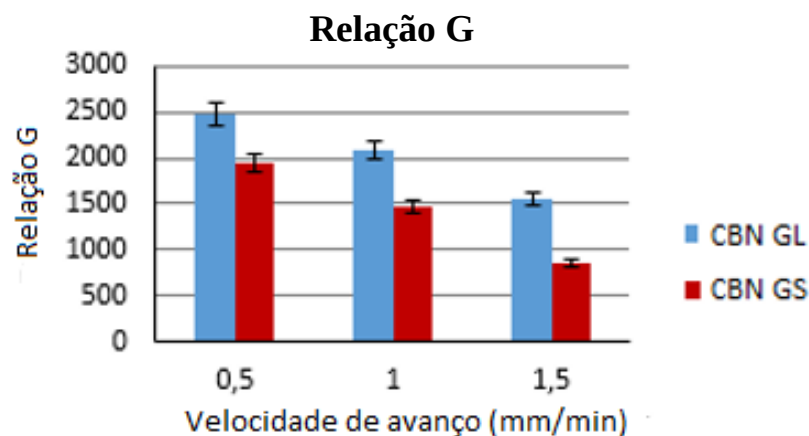


Figura 4. Valor da relação G para cada condição.

Analisando a Figura 4, é possível notar que a diferença de valores entre os rebolos CBN GL e o CBN GS apresentou um comportamento interessante, visto que para a velocidade de 0,5 mm/min a diferença na relação G entre os rebolos foi de 526,2, em 1 mm/min foi de 608,283 e em 1,5 mm/min foi de 694,2, tendo aparentemente uma crescente diferença da relação G entre eles, de modo que a cada 0,5 mm/min aumentado na velocidade de avanço, a relação G de ambos os rebolos foi reduzida consideravelmente, porém o rebolo CBN GL apresentou um valor de 80 a 90 unidades superior na diferença de valores em relação a diferença observada na velocidade de avanço anterior, ou seja, a diferença de valores na relação G foi crescente conforme se aumentou a velocidade de avanço, indicando possivelmente que o rebolo CBN GL é o mais indicado para condições em que são exigidos maiores esforços.

Com base nos dados obtidos, pode-se concluir que o rebolo mais friável (CBN GS), justamente devido ao fato de possuir como característica a presença processos de fraturas nos grãos durante o corte muito mais acentuados, apresentou um desgaste bem mais elevado que o rebolo de grãos mais tenazes (CBN GL), visto que a perda de grãos abrasivos numa taxa maior fez com que o rebolo mais friável apresentasse um diâmetro consideravelmente menor ao inicial, comparativamente ao menos friável. Isso explica os resultados obtidos.

4. CONCLUSÕES

Em relação às diferenças obtidas entre os rebolos, de maneira geral pode-se concluir que o rebolo CBN GL apresentou resultados indiscutivelmente melhores para os parâmetros de rugosidade e desgaste diametral do rebolo para todas as velocidades de avanço analisadas. Possivelmente, em uma análise de potência o rebolo CBN GS pudesse ser vantajoso, visto que teoricamente sua maior friabilidade permitiria que o corte fosse feito mais facilmente, com menor exigência da potência, provavelmente apresentando um corte mais fácil e sendo vantajoso em algumas situações, como por exemplo quando se tem o objetivo de diminuir a chance de queima do material, visto que apresentando um corte mais fácil, ele apresentaria menores temperatura na zona de contato peça-ferramenta, mas isso será estudado. A escolha da ferramenta adequada, portanto, fica a critério do cliente dependendo do uso que será dado a ela, bem como a máquina retificadora que será usada para o processo.

Já em relação à velocidade de avanço, como foi observado em todos os parâmetros de saída quantificados, seu aumento resultou em corpos de prova com características de qualidade inferior (maior rugosidade média) e em maiores exigências do rebolo, o que pode ser visto pelos valores mais elevados de desgaste diametral do rebolo. Isto pode ser explicado pelo aumento da taxa de remoção de material e da espessura equivalente de corte que ocorrem com o aumento da velocidade de avanço, resultando em um aumento das forças de corte e refletindo em todos os parâmetros de saída. A escolha da velocidade de avanço a ser utilizada em um processo qualquer fica por conta do responsável pela decisão, visto que se as peças atingirem os parâmetros desejados com maiores velocidades de avanço e se o custo x benefício for melhor, é benéfico que estas sejam utilizadas devido à maior produtividade que proporcionam.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio na concessão da bolsa de Iniciação Científica (processo 2015/10460-4), a Nikkon Ferramentas de Corte Ltda. – pertencente ao grupo Saint-Gobain Materiais Cerâmicos pela concessão dos rebolos e a Quimatic Topmatic do Brasil pela concessão do fluido de corte e ambas pela oportunidade de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Alves, M.C.S. “Análise da Influência da Velocidade de Mergulho na Retificação de Aços Endurecidos Utilizando Refrigeração Otimizada”. Tese de Mestrado em Engenharia Industrial, Universidade Estadual Paulista – Júlio de Mesquita Filho, 2005.
- Cai, R.; Rowe, W.B. “Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44, p. 1391-1402, 2004.
- Callister, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução*. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- Chiaverini, V. *Aços e ferros fundidos*. 7ª ed. SÃO PAULO: ABM, 2008.
- Denkena, B.; Grove, T.; Götsching, T. “Grinding with patterned grinding wheels”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 8, p. 12-21, 2015.
- Denkena, B.; Grove, T.; Bremer, I.; Behrens, L. “Design of bronze-bonded grinding wheel properties”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2016.
- Feres, F. “Ferro fundido nodular pode substituir o aço carbono”. *O mundo da usinagem*, 65, edição 3, 2010.
- Goodrich, G.M. *Iron Castings Engineering Handbook*. AFS, 2003.
- Guesser, W.L. *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*. 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- Guo, C.; Ranganath, S.; McIntosh, D.; Elfizy, A. “Virtual high performance grinding with CBN wheels”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, p.325-328, 2008.
- Kohout, J. “A simple relation for deviation of grey and nodular cast irons from Hooke’s Law”. *Materials Science and Engineering A313*, p.16-23, 2001.
- Kuffa, M.; Kuster, F.; Wegener, K. “Comparison of lubrication conditions for grinding of mild steel with electroplated cBN wheel”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016.
- Inasaki, I.; Meyer, H.R.; Klocke, F.; Shibata, J.; Spur, G.; Tönshoff, H.K.; Wobker, H.G. “Grinding”. *Handbook of Ceramic Grinding & Polishing*, p.190-323, 1999.
- Jackson, M.J.; Davim, J.P. *Machining with abrasives, “Abrasive Tools and Bonding Systems”*, p. 1-79, 2011.
- Klocke, F. *Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping*. Ed. Springer, p. 433, 2009.
- Kopac, J.; Krajnc, P. “Review of high-performance grinding in precision manufacturing processes”, 12ª Conferência Científica Internacional, *Achievements in Mechanical & Materials Engineering*, 2003.
- Labrecque, C.; Gagné, M. “Ductile iron: fifty years of continuous development”. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, p. 36, 1998.
- Linke, B. “Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools”. *RWTHedition*, 2016.
- Malkin, S.; GUO, C. *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*, 2008.

- Marinescu, I.D.; Hitchiner, M.; Uhlmann, E.; Rowe, W.B.; Inasaki, I. Handbook of Machining with Grinding Wheels, 2007.
- Nussbaum, G.C. Rebolos e Abrasivos Tecnologia Básica, vol. 1, p. 26-78, 1988.
- Rowe, W.B. "Principles of Modern Grinding Technology", 2ª ed., 2014.
- Sosa A.D.; Echeverría M.D. "Surface Alterations Produced in Grinding of Austempered Ductile Iron". Procedia Materials Science, vol. 8, p. 155 – 161, 2015.
- Stephenson, D.A.; Agapiou, J.S. Metal Cutting Theory and Practice, 2ª edição, 2006.
- Taborga, A.R.M; Taborga, J.D.M; Weingaertner, W.L. "ANÁLISE DO DEGASTE NA RETIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR EMPREGANDO REBOLOS DE SiC E Al₂O₃". 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (2º COBEF), 2003.
- Youssef, H.A.; El-hofy, H. Machining Technology: Machine Tools and Operations, 2008.
- Wang, J.P. "Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho". Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, 2008.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INFLUENCE OF FRIABILITY CBN GRAINS GS AND GL ON CILYNDRICAL GRINDING OF THE DUCTILE IRON

José Claudio Lopes, jclaudio.lopes@hotmail.com¹
Lucas de Martini Fernandes, luccas-asewas@hotmail.com¹
Roberta Silveira Volpato, roberta_sv@hotmail.com¹
Rodolfo Fischer Moreira de Oliveira, rodolfo.oliveira@saint-gobain.com²
Hamilton José de Mello, hamilton@feb.unesp.br¹
Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br³
Rosemar Batista da Silva, rosemar.silva@ufu.br⁴
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

²Saint-Gobain do Brasil Produtos Industriais e para Construção Ltda. - Divisão Materiais Cerâmicos.

³Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

⁴Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, FEMEC/UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, MG, Brasil.

Abstract. Amid the constant applications listed in the market and always boosted by the dynamism in obtaining new technologies, the use of ductile iron has increased in considerable rates in recent decades because of its applications to industrial fields and new discoveries properties, its attributions relate to the replacement materials which their processing require higher manufacturing cost. An example of this points to the gradual increase in the use of this material for design crankshafts and valve camshafts already currently present in the popular vehicle engines manufactured by major companies in the sector in the country, application for suspension arms, as made by French group PSA (Peugeot-Citroen), excellent results when used in exhaust manifolds and turbochargers manufactured by Canadian Westcast Industries Inc., among other plausible applications such as gears and supports for brakes. The various applicability attributed to this material are due to the versatility in respect of mechanical properties without adding alloying elements, and can extract good results with only simple heat treatment; and due to its high fluidity, it can be very close to parts dimensions and output formats, being necessary to the finishing order machining operations, more specifically those concerning the grinding. Attributed to this study is to analyze the grinding effect of ductile iron FE7000-2 (medium hardness 235-310 HB) using two types of CBN grinding wheels, having only distinction as the marked difference in friability of the abrasive grains, made up of vitrified bonded and both with the same hardness thus tend that will be analyzed the performance of each grinding wheel taking into account the results of roughness, acoustic emission, diametrical wear of the grinding wheel, optical microscopy of grinding surface and hardness. Grinding of the specimens were performed at Abrasion Machining Laboratory by Faculty of Engineering - UNESP - Bauru, and all the analyzes that will succeed will be made in the same laboratory.

Keywords. Grinding, CBN, Friability, Cast Iron.