

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DA FRIABILIDADE DOS GRÃOS ABRASIVOS
DE REBOLOS DE CBN NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA
EXTERNA DE MERGULHO DO AÇO AISI 4340

Rubens Chinali Canarim

BAURU
2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DA FRIABILIDADE DOS GRÃOS ABRASIVOS
DE REBOLOS DE CBN NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA
EXTERNA DE MERGULHO DO AÇO AISI 4340

Rubens Chinali Canarim

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da UNESP – *campus* de Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. **Eduardo Carlos Bianchi**.

BAURU
2018

Canarim, Rubens Chinali.

Influência da friabilidade dos grãos abrasivos de rebolos de CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340 / Rubens Chinali Canarim, 2018

54 f. : il.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Retificação cilíndrica externa de mergulho. 2. Rebolos de CBN. 3. Friabilidade. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RUBENS CHINALI CANARIM, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 19 dias do mês de janeiro do ano de 2018, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS EIJI HIRATA VENTURA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de São Carlos, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES do(a) Engenharia Mecânica / USP - São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de RUBENS CHINALI CANARIM, intitulada **INFLUÊNCIA DA FRIABILIDADE DOS GRÃOS ABRASIVOS DO REBOLO CBN NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DE MERGULHO DO AÇO 4340**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ



Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES



Prof. Dr. CARLOS EIJI HIRATA VENTURA



Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

*À memória de minha mãe Mariza Aparecida Chinali,
e de minha avó Abigail Manzato Chinali.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha amada esposa, Mariana, por estar sempre presente nos momentos mais importantes da minha vida.

Sou imensamente agradecido ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pela amizade, pela confiança, e por todas as oportunidades em todos esses anos de trabalho.

Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (FEB/UNESP), na pessoa do coordenador Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, que também aceitou participar do Exame Geral de Qualificação e de Defesa. Ao Prof. Dr. Edson Antônio Capello Sousa (FEB/UNESP) e ao Prof. Dr. Luís Augusto Marques Sousa da Rocha (FC/UNESP) pelo apoio e pela compreensão. Ao Eng. José Cláudio Lopes pela inestimável ajuda e amizade. A todos os colegas e alunos do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), especialmente o graduando Bruno Biondo Domingues.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Soufen pela solicitude e disponibilização do Laboratório de Materiais (FEB/UNESP). À Prof^ª Dr^ª. Maria da Penha Cindra Fonseca pela realização dos ensaios de Tensão Residual no Laboratório de Análise de Tensões (LAT/UFF). Ao Dr. Hamilton José de Mello, pela ajuda e pela experiência compartilhada em toda a realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Ivaldo de Domenico Valarelli pelas contribuições no Exame Geral de Qualificação, e aos Aos Profs. Drs. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves (FEB/UNESP), Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar) e Alessandro Roger Rodrigues (EESC/USP) por terem aceito o convite para a banca de Exame Geral de Defesa.

À empresa Saint-Gobain Materiais Cerâmicos, na pessoa do Eng. Rodolfo Fischer Moreira Oliveira, Gerente Comercial da América do Sul, pela doação dos rebolos utilizados neste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa, sem a qual não seria possível a realização do presente trabalho.

RESUMO

A presente tese estudou a influência da friabilidade de dois rebolos de CBN (alta friabilidade – HF e baixa friabilidade – LF) na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340, temperado e revenido, para vários avanços. Os resultados obtidos demonstraram que, comparativamente, o rebole de baixa friabilidade (CBN LF) fornece melhor acabamento para a peça em termos de rugosidade e desvios de circularidade, com menor desgaste de rebole, em todos os avanços. Por outro lado, o consumo de potência e seus sinais de emissão acústica foram sempre mais elevados. Para a tensão residual, a baixa friabilidade auxilia na geração de tensões compressivas na peça. Todavia, mesmo com a alta friabilidade, para condições mais agressivas de corte também é possível obter tensões compressivas elevadas. Nenhuma das condições de usinagem alterou a microestrutura das peças retificadas, com base nos resultados de microdureza Vickers. A elevada friabilidade, de um modo geral, pode promover fratura excessiva dos grãos, que acabam por aumentar o riscamento e deteriorar a qualidade superficial das peças, além de desgastar mais o rebole, em virtude do predomínio da macrofratura sobre a microfratura. Ao mesmo tempo, contudo, reduz as forças de corte e o consumo de potência. Deve-se levar em conta todos os fatores à disposição para efetuar a melhor escolha de rebole e sua friabilidade para determinada aplicação.

Palavras-chave: retificação cilíndrica externa de mergulho, rebolos de CBN, friabilidade

ABSTRACT

The present thesis aimed to study the influence of friability of two CBN wheels (high friability – HF and low friability – LF) on the external plunge cylindrical grinding of the AISI 4340 steel, quenched and tempered, for different feed rates. The results showed that CBN LF provided better workpiece finishing in terms of surface roughness and roundness deviations, with lower wheel wear, in all feed rates. However, power consumption and acoustic emission signals were always higher than for CBN HF. For residual stresses, low friability contributes to the generation of compressive stresses on the workpiece. For high feed conditions, even CBN HF can provide high compressive stresses. None of the grinding conditions caused alterations on the workpiece microstructure, based on the results for Vickers microhardness. High friability can promote excessive grain fracture, which can increase scratching and deteriorate the surface quality, causing higher wheel wear as well (since macrofracture predominates over microfracture). On the other side, it can reduce cutting forces and power consumption. All factors at disposal must be taken into account in order to conduct the optimal selection of grinding wheel– as well as its adequate friability – for each specific application.

Keywords: external cylindrical plunge grinding, CBN wheels, friability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Grandezas físicas do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho (MARINESCU et al, 2007 – Adaptado).....	16
Figura 2	Principais constituintes do rebolo (WEBSTER e TRICARD, 2004 - Adaptado).....	17
Figura 3	Modos de quebra do grão/ligante no rebolo (JACKSON e HITCHINER, 2011).....	20
Figura 4	Tolerância de circularidade (AGOSTINHO, 1981 - Adaptado).....	22
Figura 5	Fontes de emissão acústica na retificação (KARPUSCHEWISKI, 2001 - Adaptado)..	25
Figura 6	Relação entre energia específica de retificação e rugosidade (MARINESCU et al. 2007 - Adaptado).....	26
Figura 7	Plano de ensaios.....	28
Figura 8	Variáveis de saída analisadas.....	29
Figura 9	Corpo de prova utilizado – AISI 4340 temperado e revenido (fora de escala).....	30
Figura 10	Grãos abrasivos de um rebolo CBN HF.....	31
Figura 11	Grãos abrasivos de um rebolo CBN LF.....	32
Figura 12	Região de análise das tensões residuais nas amostras.....	34
Figura 13	Figura 13: Esquema ilustrativo do processo: impressão do perfil do rebolo na peça.....	35
Figura 14	Rugosidade Ra [μm] para cada condição de ensaio.....	37
Figura 15	Rugosidade Rz [μm] para cada condição de ensaio.....	38
Figura 16	Desvios de circularidade [μm] para cada condição de ensaio.....	39
Figura 17	Peça retificada com 0,25 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.....	41
Figura 18	Peça retificada com 0,25 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.....	41
Figura 19	Peça retificada com 0,50 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.....	42
Figura 20	Peça retificada com 0,50 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.....	42
Figura 21	Peça retificada com 0,75 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.....	43
Figura 22	Peça retificada com 0,75 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.....	43
Figura 23	Peça retificada com 1,00 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.....	44
Figura 24	Peça retificada com 1,00 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.....	44
Figura 25	Tensões residuais longitudinais [MPa] para cada condição de ensaio.....	45
Figura 26	Tensões residuais transversais [MPa] para cada condição de ensaio.....	46
Figura 27	Desgaste dos rebolos [μm] para cada condição de ensaio.....	47

Figura 28	Sinais de emissão acústica [V] para cada condição de ensaio.....	48
Figura 29	Sinais de potência [W] para cada condição de ensaio.....	49
Figura 30	Microdureza Vickers [HV] para cada condição de ensaio.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros de usinagem	27
Tabela 2	Parâmetros utilizados no sistema de análise das tensões residuais.	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 JUSTIFICATIVA.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 O processo de retificação.....	15
3.2 O rebolo.....	17
3.2.1 Friabilidade dos grãos abrasivos.....	18
3.2.2 Nitreto de boro cúbico (CBN).....	20
3.3 Análise das principais variáveis de saída do processo de retificação.....	20
3.3.1 Rugosidade.....	20
3.3.2 Desvio de circularidade.....	21
3.3.3 Microdureza.....	22
3.3.4 Tensões residuais.....	22
3.3.5 Desgaste do rebolo.....	23
3.3.6 Emissão acústica.....	23
3.3.7 Potência.....	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
4.1 Parâmetros de retificação.....	26
4.2 Plano de ensaios.....	27
4.3 Ensaios.....	28
4.3.1 Retificação.....	28
4.3.2 Rebolo.....	30
4.3.3 Aquisição de sinais.....	31
4.4 Variáveis de saída.....	31
4.4.1 Rugosidade.....	31
4.4.2 Desvios de circularidade.....	32

4.4.3 Microdureza Vickers.....	32
4.4.4 Tensão residual.....	32
4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	33
4.4.6 Desgaste do rebolo.....	34
4.4.7 Emissão acústica.....	34
4.4.8 Potência.....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1 Rugosidade (Ra e Rz).....	36
5.2 Desvios de circularidade.....	38
5.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	39
5.4 Tensão residual.....	44
5.5 Desgaste do rebolo.....	46
5.6 Emissão acústica.....	47
5.7 Potência.....	48
5.8 Microdureza Vickers.....	49
5.9 Discussão.....	50
CONCLUSÃO.....	51
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Retificação é um processo de usinagem por abrasão, que faz uso de uma ferramenta de corte denominada rebolo, composta por grãos abrasivos aleatoriamente distribuídos, unidos por um ligante (LINKE, 2015).

A friabilidade é a habilidade do grão abrasivo de se fraturar a fim de serem geradas novas arestas de corte, sendo oposta à resistência à fratura (YOUSSEF e EL-HOFY, 2008). Cada grão ou conjunto de grãos abrasivos possui determinada dureza, resistência à abrasão, estrutura cristalina (forma, tamanho e arranjo), sendo de grande influência na friabilidade e na durabilidade do abrasivo (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Um grão com baixa friabilidade consegue resistir ao desgaste e às altas pressões de corte, mas está sujeito à excessiva geração de calor e eventuais danos ao rebolo ou à superfície da peça. Por outro lado, grãos muito friáveis tendem a se desgastar muito rapidamente, diminuindo a vida útil do rebolo. Portanto, o objetivo deve ser o de usar grãos suficientemente friáveis para não comprometer nenhum dos aspectos supracitados (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Os rebolos de CBN com ligante vitrificado são ferramentas abrasivas promissoras devido ao seu excelente desempenho na retificação, promovendo altas taxas de remoção, alta resistência térmica, boa friabilidade, fácil dressagem, longa vida útil e baixo custo total. Em comparação aos ligantes metálicos e resinoides, o ligante vitrificado apresenta maior dureza e uma capacidade de autoafiação significativamente maior.

O presente trabalho determinou a influência da friabilidade dos grãos de dois rebolos superabrasivos de nitreto de boro cúbico (CBN) com ligante vitrificado na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340, temperado e revenido. Os rebolos possuem as mesmas características gerais (dureza, estrutura, ligante, etc.), sendo apenas diferenciados por uma acentuada variação na friabilidade de seus grãos abrasivos, sendo classificados como CBN HF (alta friabilidade) e CBN LF (baixa friabilidade).

O desempenho de cada rebolo foi analisado em relação aos seguintes parâmetros de saída: rugosidade da peça, desvios de circularidade, desgaste do rebolo, emissão acústica, potência de retificação, microdureza Vickers, tensão residual e microscopia eletrônica de varredura.

2 JUSTIFICATIVA

A seleção do rebolo de CBN mais apropriado e com melhor custo-eficiência tem se tornado cada vez mais complexa devido à disponibilidade de grande diversidade de materiais abrasivos de alta qualidade. Por isso, deve-se estudar qual o rebolo mais adequado para cada aplicação. Pesquisas envolvendo grãos de rebolos CBN são de essencial importância para avaliar seu desempenho e possível redução de custo no processo, além da obtenção dos resultados mais satisfatórios na peça usinada.

Os fabricantes podem escolher entre diferentes níveis de friabilidade dos grãos abrasivos dentro de um mesmo tipo de rebolo (MARINESCU *et al.*, 2013). Uma elevada tenacidade (baixa friabilidade) não leva necessariamente a uma vida longa do grão. Por um lado, grãos que são muito tenazes para determinada aplicação podem se tornar “cegos” (sem afiação) e gerar mais atrito, levando a danos térmicos e deterioração da qualidade superficial. Por outro lado, grãos muito friáveis se desgastam muito rapidamente, resultando em uma vida curta da ferramenta, além de possíveis erros de forma (LINKE, 2015).

Além disso, uma das principais motivações para a realização do presente trabalho se deu por uma necessidade industrial (da empresa Saint-Gobain Materiais Cerâmicos) e pela escassez de estudos específicos envolvendo a friabilidade de rebolos no processo de retificação, e sua influência nos parâmetros de usinagem e de qualidade superficial da peça, razão pela qual, juntamente à empresa, dois rebolos com grãos de notável diferença na friabilidade foram estudados. Suas propriedades, bem como a sua correta seleção, possuem grande influência na produtividade do processo e na qualidade superficial da peça (DENKENA *et al.*, 2016).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, destinado à obtenção de superfícies com alto grau de acabamento, utilizando uma ferramenta abrasiva de revolução (rebolo) (LINKE, 2015), composta por um grande número de grãos abrasivos aleatoriamente orientados e aglutinados por um ligante (REN *et al.*, 2009).

A eficiência do rebolo no processo de remoção de material está relacionada com o aglutinante, a porosidade, o tipo de abrasivo empregado. Além disso, condições de usinagem podem aumentar substancialmente a vida útil da ferramenta com uma maior capacidade de remoção de material. Pelo elevado número de variáveis envolvidas, a retificação é considerada muitas vezes como um processo complexo (BIANCHI *et al.*, 2011).

A remoção de material depende da habilidade dos grãos abrasivos de penetrar efetivamente o material (LINDSAY, 1999). Ela requer quantidades elevadas de energia específica, onde grande parte é fornecida para vencer principalmente o atrito, que é convertido em calor, concentrado principalmente na região de contato (TAWAKOLI *et al.*, 2009). Como a geração de calor excessivo pode provocar danos térmicos à superfície da peça, aplica-se um fluido lubrificante na zona de corte (BRINKSMEIER *et al.*, 2009).

Para melhor entender o funcionamento do processo e suas variáveis, a Figura 1 apresenta esquematicamente as principais grandezas físicas envolvidas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

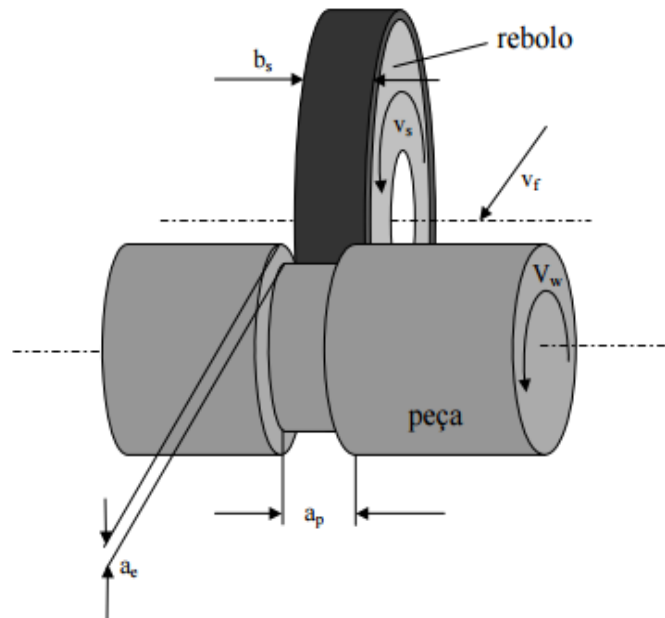


Figura 1: Grandezas físicas do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho (MARINESCU et al., 2007 – Adaptado).

Sendo:

- a_p a largura de corte [mm],
- a_e a profundidade de corte [mm]
- v_s a velocidade periférica do rebolo (velocidade de corte) [m/s]
- v_w a velocidade tangencial da peça [m/s];
- v_f a velocidade de mergulho (avanço) [mm/min]; e
- b_s a largura do rebolo [mm]

A velocidade de mergulho (ou avanço) corresponde à velocidade do rebolo na direção radial, a partir do contato. Este parâmetro afeta o acabamento final da peça e as forças de corte, que se elevam com o aumento desta velocidade (MARINESCU *et al.*, 2013).

O aumento da velocidade de avanço (mantendo as outras velocidades constantes) gera um aumento da taxa de remoção de material, das forças de corte e da rugosidade, diminuindo o tempo de dressagem do rebolo. Até valores excessivos, o aumento do avanço costuma ser bem satisfatório energeticamente, sem levar a um desgaste indesejado do rebolo (ROWE, 2014).

3.2 O rebolo

Na retificação, o rebolo é um dos elementos mais importantes do processo, além dos fluidos de corte e da máquina retificadora. Sua estrutura, composição química, topografia superficial e comportamento ao desgaste definem o processo de usinagem com relação à qualidade da peça, integridade superficial, estabilidade do processo e produtividade (LINKE, 2015).

Os rebolos são compostos por três elementos (Figura 2): o grão abrasivo, gerador de arestas de corte; o espaço intergranular, para armazenagem da mistura entre cavaco e fluido lubri-refrigerante; e o ligante, material que une os grãos no rebolo (WEBSTER e TRICARD, 2004).

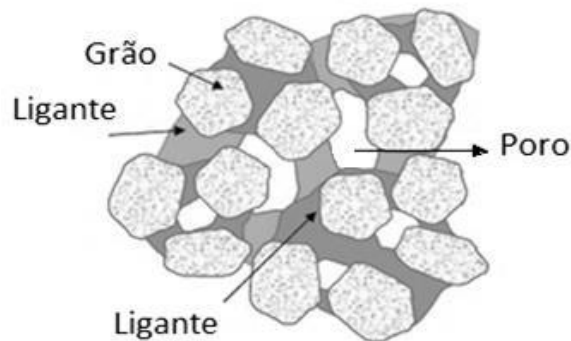


Figura 2: Principais constituintes do rebolo (WEBSTER e TRICARD, 2004 - Adaptado).

O desgaste do rebolo está intrinsecamente associado à falha de seus componentes, podendo ser dividido em três fenômenos: atrito devido às forças de corte e aumento de energia; fratura do grão (friabilidade); e fratura do ligante, que estão relacionados à autoafiação da ferramenta abrasiva (BADGER, 2009)

Quatro propriedades principais dos grãos decidem a eficiência do processo de corte: dureza, resistência térmica, tenacidade e friabilidade (SALONITIS *et al.*, 2014). A escolha de um abrasivo para uma determinada aplicação é baseada em testes de durabilidade, envolvendo resistência ao impacto, resistência à fadiga, compressão, friabilidade e resistência ao lascamento, sob a influência de tensões térmicas (MARINESCU *et al.*, 2013).

Os tipos mais importantes de grãos abrasivos utilizados na retificação são os abrasivos convencionais (óxido de alumínio, Al_2O_3 , e carbetto de silício, SiC) e superabrasivos (nitreto de boro cúbico, CBN, e o diamante, natural ou sintético) (LINKE, 2015).

As propriedades térmicas dos grãos abrasivos influem na resistência ao desgaste, pois a dureza da maioria deles diminui com a temperatura, sendo importante as condições reais de operação para a melhor escolha do abrasivo (ROWE, 2014). Os grãos devem possuir estabilidade térmica quando submetidos às elevadas temperaturas do processo de corte (KLOCKE, 2009).

3.2.1 Friabilidade dos grãos abrasivos

A tenacidade é a resistência de um material contra fratura e propagação de trincas, sendo usualmente medida em condições dinâmicas. O termo friabilidade, então, pode ser definido como o inverso da tenacidade à fratura (JACKSON e DAVIM, 2011). A tenacidade do grão implica em como o grão irá fraturar quando interagir com a peça. O comportamento de fratura pode variar entre a quebra de partículas maiores ou menores, deixando na superfície do rebolo uma topografia mais lisa ou mais áspera, com mais ou menos arestas de corte (LINKE, 2015).

Grãos mais tenazes podem implicar em menor desgaste da ferramenta, mas podem tornar-se cegos e aumentar o atrito, levando a danos térmicos e vibrações elevadas no processo. Grãos mais friáveis expõem arestas de corte novas e afiadas mais facilmente, mas podem resultar em baixa vida útil do rebolo, além de erros de forma. A fratura do grão também é importante na dressagem, porque define a afiação do rebolo (BASERI *et al.*, 2008).

Enquanto a dureza fornece uma medida para a tendência do grão se desgastar por atrito na escala atômica, a tenacidade à fratura (ou, seu inverso, a friabilidade) corresponde à resistência do grão abrasivo se fraturar sob uma determinada força ou impacto (NUSSBAUM, 1988). A friabilidade fornece uma medida para a perda de grãos abrasivo devido à fratura ou estilhaçamento dos grãos, em escala micrométrica (microfratura) ou macrométrica (macrofratura) (JACKSON e HITCHINER, 2011).

O tamanho de grão e a tenacidade estão relacionados, em virtude de grãos menores e monocristalinos possuírem menos defeitos (FIELD e FREEMAN, 1981). Além disso, o grau da fratura é fortemente dependente das propriedades do grão, como tamanho e morfologia, impurezas, inclusões e trincas pré-existentes. É também muito dependente do nível e da natureza das forças aplicadas durante a retificação, além de fatores como choques térmicos devidos à ação do fluido de corte (JACKSON e HITCHINER, 2011).

Idealmente, o grão deve fraturar e perder partículas relativamente finas, tipicamente da escala micrométrica ou submicrométrica (microfratura). O restante do grão deve permanecer afiado e capaz de cortar. Se o grão é muito tenaz e o ligante apresenta baixa dureza, ou a força de corte na retificação é extremamente elevada, então o grão pode se desprender do ligante sem ter realizado qualquer trabalho útil de usinagem (JACKSON e HITCHINER, 2011)

Uma vez que o ligante seja duro o suficiente para reter o grão, mas que haja forças de corte extremamente elevadas, então a fratura frequentemente leva a uma perda grosseira do grão devido à macrofratura, sem que ainda tenha realizado o máximo de trabalho útil possível. Por outro lado, se o grão é tenaz e o ligante é duro ou resistente a desgastes mecânicos, térmicos ou químicos, ocorre a perda de afiação, resultando na criação de grãos sem arestas de corte, aumentando as forças de corte e a temperatura na interface entre rebolo e peça (JACKSON e HITCHINER, 2011). Os fenômenos supracitados são apresentados na Figura 3:

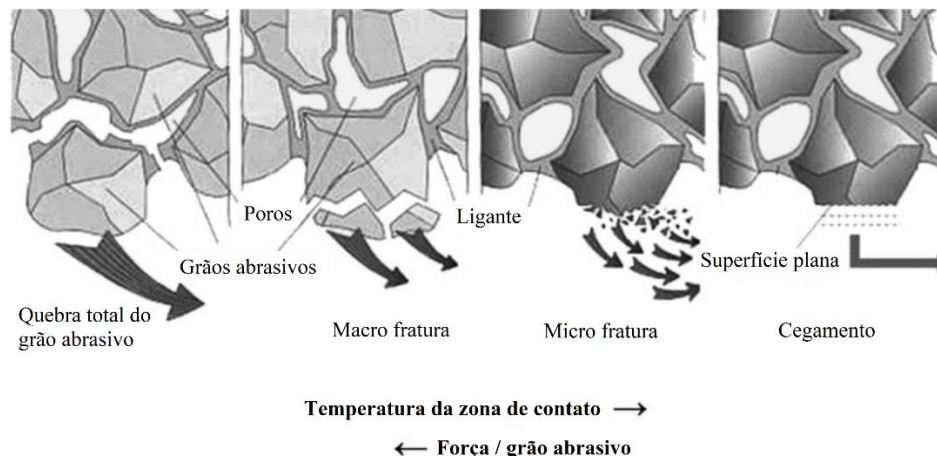


Figura 3: Modos de quebra do grão/ligante no rebolo (JACKSON e HITCHINER, 2011).

3.2.2 Nitreto de boro cúbico (CBN)

O nitreto de boro cúbico (CBN) é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, sob pressões e temperaturas elevadas. Juntamente com o diamante, tem sido designado como superabrasivo. Comparados aos abrasivos convencionais, são mais duros, mais resistentes ao desgaste e possuem uma maior vida útil quando usados adequadamente (KOPAC e KRAJNIK, 2006).

3.3 Análise das principais variáveis de saída do processo de retificação

3.3.1 Rugosidade

A rugosidade compõe-se de microirregularidades geométricas presentes na superfície do material usinado, sendo um parâmetro utilizado para quantificar a qualidade topográfica de uma superfície (HECKER e LIANG, 2003). Além da precisão dimensional, de forma e de posição, o controle de rugosidade é fundamental para os componentes submetidos a condições de atrito, desgaste e corrosão.

No processo de retificação, a rugosidade depende basicamente de três principais fatores: o rebolo, a dressagem e as condições de usinagem (PUERTO *et al.*, 2013).

A rugosidade possui forte relação com características como eficiência na lubrificação, vida útil do rebolo, resistência à fadiga e corrosão da peça usinada. O uso de lubri-refrigerantes pode reduzir as forças e a energia envolvida no processo, de modo a proporcionar menor rugosidade na superfície (WECK *et al.*, 2001). O tamanho e a forma do grão abrasivo também podem influenciar na redução da rugosidade, uma vez que, quanto mais arestas de corte estão em contato com a superfície, menor é a rugosidade gerada (BIGERELLE *et al.*, 2008)

3.3.2 Desvio de circularidade

O desvio de circularidade de uma peça cilíndrica é o desvio radial macrogeométrico do contorno externo em relação a um formato circular ideal. Surge principalmente da falta de rigidez (fixações inadequadas das peças e as condições de usinagem) e do desgaste das ferramentas. Além disso, podem ocorrer por lubri-refrigeração inadequada, ação incorreta de corte (grãos com arestas cegas) e defeitos nos componentes da máquina (SILVA *et al.*, 2007; AYUBI *et al.*, 2014).

A tolerância de circularidade é determinada por duas circunferências que têm o mesmo centro e raios diferentes, sendo o centro dessas circunferências coaxial à peça. A diferença entre os diâmetros D e d da forma teórica (*círculo B*) e da forma real (*círculo A*), respectivamente, como mostra a Figura 4, corresponde ao campo de tolerância de circularidade (AGOSTINHO, 1981).

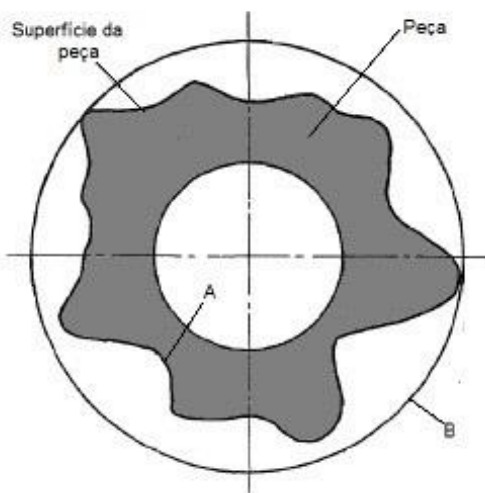


Figura 4: Tolerância de circularidade (AGOSTINHO, 1981 - Adaptado).

É de grande importância a análise do erro de circularidade, uma vez que a peça somente é submetida à retificação cilíndrica externa de mergulho quando requer boa qualidade superficial e estreitos limites de tolerância dimensional e geométrica.

3.3.3 Microdureza

A elevada geração de calor do processo e o aumento drástico da temperatura na zona de corte podem causar trincas, queimas e amaciamento superficial na peça usinada (MALKIN e GUO, 2007). O rápido resfriamento provocado pelo fluido de corte induz deformação plástica na superfície e subsuperfície da peça, afetando o perfil de microdureza (KUMAR *et al.*, 2011).

Além disso, as medições de microdureza são importantes para avaliar as possíveis alterações microestruturais induzidas durante o processo de usinagem (MAO *et al.*, 2010), a fim de garantir a qualidade e a integridade superficiais (AURICH *et al.*, 2013), pois refletem a condição estrutural das camadas próximas à superfície retificada. A superfície e a subsuperfície da peça que foi afetada por danos térmicos podem apresentar alterações da microestrutura (têmpera e revenimento), que resultam em variações de dureza (MARINESCU *et al.*, 2004).

3.3.4 Tensões residuais

O processo de retificação leva à formação de tensões residuais nas proximidades da superfície retificada, que podem afetar seu comportamento mecânico (BIANCHI *et al.*, 2000). As tensões de usinagem são geradas pela expansão e contração térmicas durante a remoção de material, por transformações microestruturais e pelas deformações plásticas causadas pelos grãos abrasivos. A influência dos efeitos térmicos causa tensões residuais de tração (dilatação), enquanto os efeitos mecânicos de usinagem, tensões de compressão (interação rebole-peça). Assim, a tensão residual resultante é a interação entre os efeitos térmicos e mecânicos (MARINESCU *et al.*, 2007).

A tensão residual é um dos parâmetros utilizados para verificar diversas alterações superficiais da peça após processo de retificação (BRINKSMEIER *et al.*, 1982). Ela pode ser medida de modo não destrutivo por uma variedade de métodos, incluindo difração de raios-x (ASM HANDBOOK, 1989).

Durante o processo de remoção de material, as camadas externas da peça acabam se dilatando mais do que as internas (por estarem em maiores temperaturas), levando à formação de

tensões residuais de compressão na superfície da peça. Quando o rebolo não está mais atuando, no resfriamento da peça, a camada externa deveria se contrair mais, o que não é permitido pelas camadas inferiores. Assim, surgem tensões residuais de tração na superfície da peça durante o resfriamento, e, para que ocorra um equilíbrio mecânico, aparecem tensões residuais de compressão nas camadas inferiores mais próximas (MALKIN e GUO, 2007).

As tensões residuais podem atuar benéfica ou prejudicialmente no desempenho dos componentes mecânicos. As tensões de tração são prejudiciais em termos de resistência mecânica, ao desgaste e à corrosão superficial, enquanto as tensões residuais de compressão são consideradas benéficas, aumentando a resistência à fadiga, uma vez que impedem a nucleação e a propagação das trincas (MALKIN e GUO, 2007).

3.3.5 Desgaste do rebolo

Existem três formas básicas de desgaste do rebolo durante a retificação de uma peça: desgaste abrasivo e/ou por adesão, fratura do grão e fratura do ligante. As formas de desgaste ocorrem em virtude das solicitações mecânicas às quais o rebolo é submetido, além da deterioração térmica do ligante (LIAO *et al.*, 2000).

O desgaste da ferramenta abrasiva durante a retificação influencia nos erros na profundidade de corte e na qualidade final da peça, no aumento das forças do processo e no aumento ou decréscimo da rugosidade superficial, além do número de arestas de corte efetivas e no tempo de dressagem (MARINESCU *et al.*, 2013).

3.3.6 Emissão acústica

Nas últimas décadas, a aquisição de sinais vem se propagando através da utilização de sensores. A exemplo, a emissão acústica tem se tornado comum para todo tipo de processo de usinagem, sensores de baixo custo, fácil montagem, resistência a influências externas, e ainda capazes de monitorar peças em rotação (MARINESCU *et al.*, 2013).

O sinal de emissão acústica é baseado na detecção de ondas de tensão elástica transientes geradas devido à rápida liberação de energia no rearranjo da microestrutura interna de um material submetido a um impulso externo (REN *et al.*, 2014). Essas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material, que podem ser detectadas por um sensor piezoelétrico, que converte os deslocamentos em sinais elétricos (MOIA *et al.*, 2015).

Na retificação, a emissão acústica é a energia resultante da interação entre o grão abrasivo e a peça, podendo também representar a variação de tensão que se propaga por meio da estrutura do material (Figura 5) (KARPUSCHEWSKI, 2001). Além disso, compreende fenômenos induzidos pela formação do cavaco, atrito, fratura do grão/ligantes e transições de fases ativadas termo e mecanicamente. Todavia, seu estudo apresenta-se desafiador, já que orientação e a distribuição dos grãos abrasivos são irregulares, diferentemente do que ocorre em processos com ferramenta de geometria definida (BABEL *et al.*, 2013).

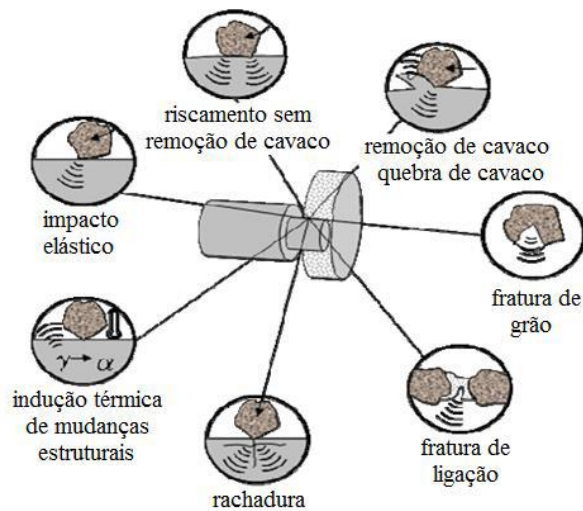


Figura 5: Fontes de emissão acústica na retificação (KARPUSCHEWSKI, 2001 - Adaptado).

3.3.7 Potência

A potência de retificação está diretamente relacionada com a força tangencial de corte e a velocidade do rebolo, podendo ser calculada pelo produto das duas variáveis (MALKIN, 2008). Isso se deve ao fato de a força tangencial ser a componente da força de retificação responsável pela dissipação de potência em situações de alta velocidade do rebolo. Geralmente, a potência associada ao avanço e à velocidade transversal é desprezada (MARINESCU *et al.*, 2013).

A energia específica corresponde à quantidade de trabalho necessária para separar um determinado volume de material do seu substrato. Essa energia está associada a três fenômenos distintos: formação do cavaco, atrito entre os grãos abrasivos e a peça e dissipação de energia na deformação plástica (TÖNSHOFF *et al.*, 1999).

Valores de energia específica elevados estão relacionados a elevados gradientes térmicos, além de altas tensões residuais e danos à integridade do material. Essa relação vale para a rugosidade (SALMON, 1992), sendo inversamente proporcional, como pode ser visto na Figura 6.

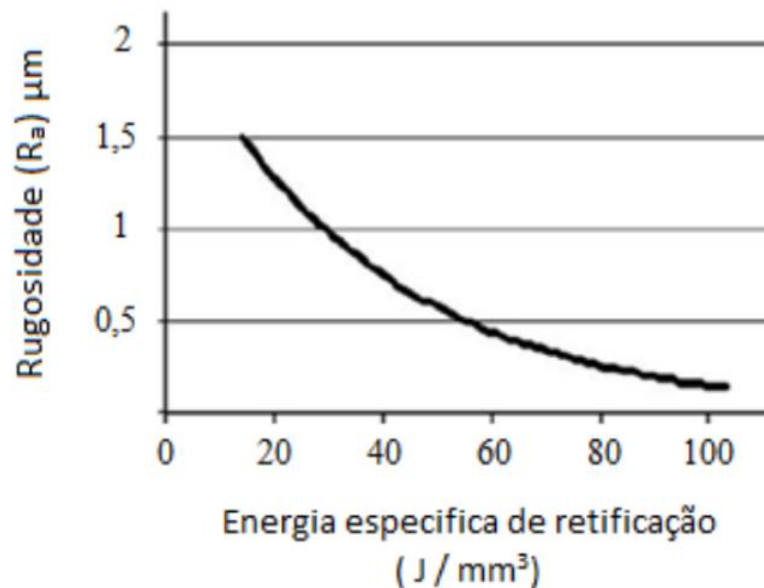


Figura 6: Relação entre energia específica de retificação e rugosidade (MARINESCU *et al.* 2007 - Adaptado).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Parâmetros de retificação

Os parâmetros definidos para esta pesquisa estão fundamentados na prática do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP) e em uma série de ensaios preliminares, a fim de determinar as melhores condições de retificação para o presente estudo. Todas as amostras seguiram os mesmos procedimentos e as mesmas condições, a fim de que se possa avaliar a influência da friabilidade de dois rebolos de CBN (LF e HF) nos parâmetros de saída. A Tabela 1 expõe os parâmetros de usinagem e os respectivos valores das variáveis que apresentaram as melhores condições durante a usinagem:

Tabela 1: Parâmetros de usinagem

DESCRIÇÃO	PARÂMETRO
Processo	Retificação cilíndrica externa de mergulho
Rebolos	Nitreto de boro cúbico (CBN LF e HF)
Avanço [mm/min]	0,25, 0,50, 0,75 e 1,00
Velocidade de corte [m/s]	32
Rotação do rebolo [rpm]	1780
Velocidade da peça [m/s]	0,5
Rotação da peça [rpm]	163
Largura de retificação [mm]	4,5
Tempo de centelhamento [s]	1,8
Método de lubrificação	Convencional (fluido abundante)
Fluido de corte	Tapmatic Quimatic ME-1 (semi-sintético 3% v.)
Vazão do fluido de corte [l/min]	17
Pressão do fluido de corte [MPa]	0,3
Dressador	Conglomerado (15x8x10 mm)
Profundidade de dressagem [μm]	40 passes de 2 μm (80 μm total)
Velocidade de dressagem [m/min]	3,0
Corpos de prova	Aneis de aço AISI 4340, temperados e revenidos (58 ± 2 HRC; 717 ± 48 HV)
Quantidade de peças	8 condições e 3 repetições (24 no total)

4.2 Plano de ensaios

Para o presente trabalho, foram utilizados dois rebolos (CBN LF - baixa friabilidade e HF - alta friabilidade) e quatro avanços (velocidades de mergulho), a fim de se observar o comportamento de friabilidade dos grãos abrasivos em condições mais ou menos agressivas de corte (maior ou menor avanço), conforme pode ser observado na Figura 7. Três amostras foram retificadas em cada avanço, e as mesmas condições de usinagem do item 4.1 foram aplicadas em cada uma delas.

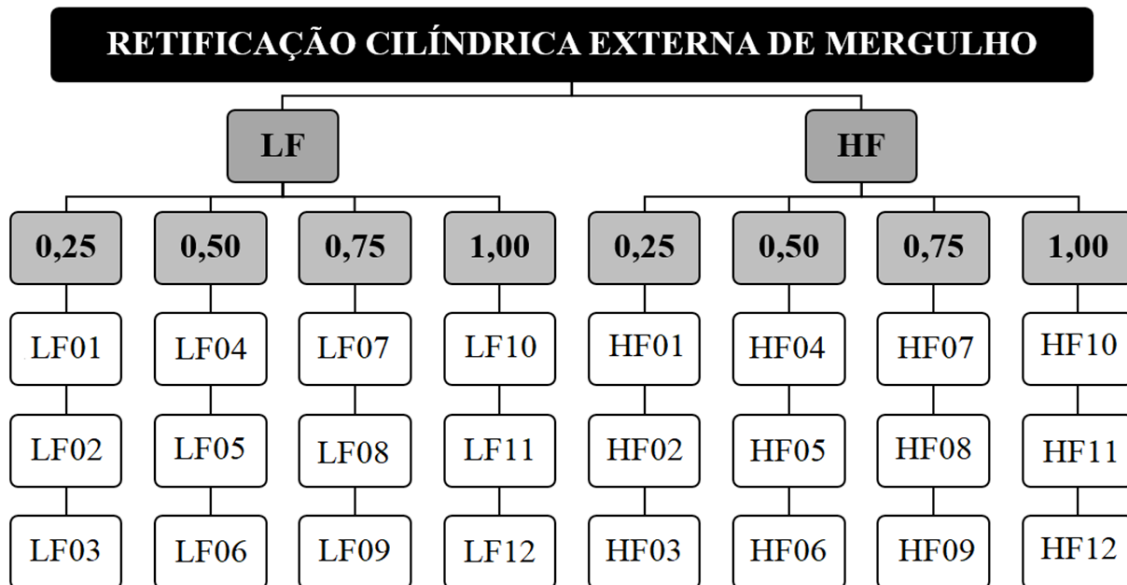


Figura 7: Plano de ensaios

A análise dos resultados foi conduzida mediante dois grupos de variáveis de saída: parâmetros relativos à peça retificada (rugosidade superficial, desvios de circularidade, microdureza Vickers, tensão residual e microscopia eletrônica de varredura) e de monitoramento do processo (desgaste do rebole, emissão acústica e potência de retificação). A Figura 8 apresenta esquematicamente a distribuição dos resultados nos dois grupos supracitados.

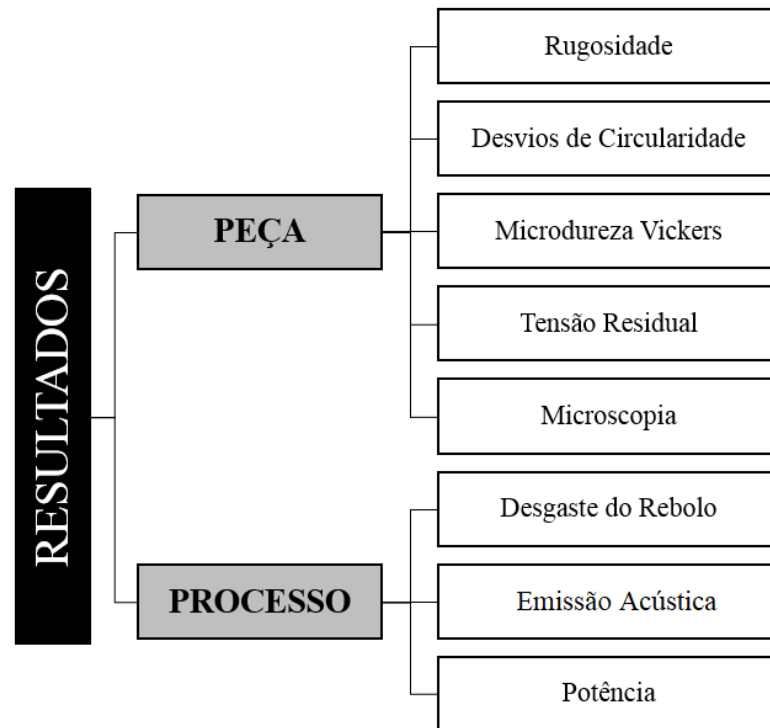


Figura 8: Variáveis de saída analisadas

4.3 Ensaios

4.3.1 Retificação

Os experimentos foram realizados na retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica RUAP 515H, com processador de comando numérico Fagor. Neste trabalho, a máquina foi utilizada para as etapas de retificação dos corpos de prova e avaliação do desgaste do rebolo. As rotinas dos comandos numéricos computadorizados para os processos foram padronizadas para todas as condições de ensaio.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram fabricados em aço AISI 4340, temperado e revenido (58 ± 2 HRC; 717 ± 48 HV), com as seguintes dimensões (Figura 9):

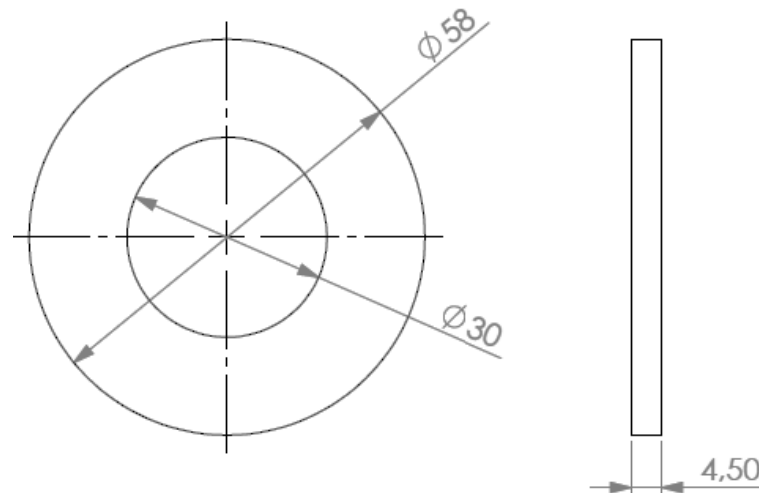


Figura 9: Corpo de prova utilizado – AISI 4340 temperado e revenido (fora de escala)

O aço AISI 4340 é o que apresenta maior temperabilidade dentre os aços utilizados na construção mecânica. Apesar de ser de difícil usinabilidade e soldabilidade, apresenta boa forjabilidade e é muito utilizado na fabricação de peças que combinam tenacidade e resistência mecânica, apresentando propriedades uniformes em sua seção transversal, obtidas por têmpera seguida de revenimento (SILVA *et al.*, 2013).

Após os tratamentos térmicos, a fim de produzir peças com dimensionamento preciso, a retificação do material é de suma importância, uma vez que ela elimina as distorções dimensionais causadas (SILVA *et al.*, 2013).

A dressagem foi realizada com o dressador multigranular (conglomerado) Master Diamond, com matriz metálica de 15x8x10 mm. Foi realizada uma penetração de 2 μm por passada do rebolo durante o perfilamento até que a superfície do rebolo ficasse uniforme (eliminado todo o desgaste do ensaio), sendo previsto um valor de 80 μm . As condições de dressagem do rebolo foram mantidas constantes em todos os corpos de prova.

O sistema de lubrificação utilizado foi o convencional, que consiste na aplicação abundante do fluido de corte, em uma emulsão em água com 3% de óleo solúvel mineral convencional semissintético Quimatic Tapmatic ME-1.

4.3.2 Rebolo

Para a realização dos ensaios, foram utilizados dois rebolos de CBN, cedidos generosamente ao Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da UNESP, *campus* de Bauru, pela empresa *Saint-Gobain Materiais Cerâmicos*. Confeccionados pela empresa *Nikkon*, cada rebolo possui grãos de friabilidades extremamente distintas (mantendo-se as demais propriedades), sendo o mais friável denominado no presente trabalho CBN HF (*high friability*, SNB151GSQ12VR2) e o menos friável denominado CBN LF (*low friability*, SNB151GLQ12VR2).

De acordo com a *Saint-Gobain Abrasivos*, o rebolo de CBN HF apresenta grãos de coloração preta (Figura 10), de formato irregular, e são designados para baixas forças de corte e aplicações de retificação onde versatilidade e baixo custo são o mais importante. A maioria de seus grãos se quebra por macrofratura, mas expõe múltiplas arestas de corte.



Figura 10: Grãos abrasivos de um rebolo CBN HF.

Já o rebolo de CBN LF possui grãos abrasivos monocristalinos de CBN, de coloração âmbar (Figura 11), com uma tenacidade à fratura muito elevada, predominando a ocorrência de micro fraturas, sendo a escolha ideal para rebolos de monocamada abrasiva para aplicações de grande remoção de material e altas forças de corte, com exigências de bom acabamento superficial.

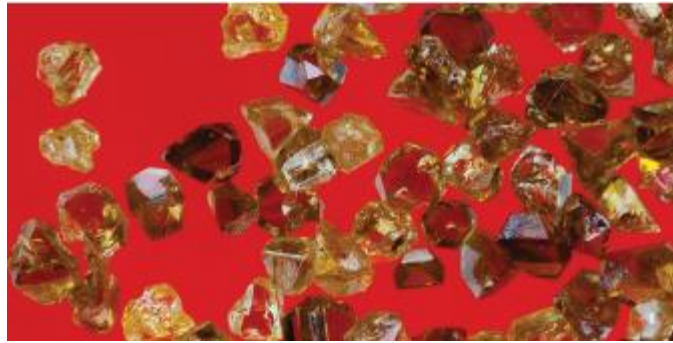


Figura 11: Grãos abrasivos de um rebolo CBN LF.

4.3.3 Aquisição de sinais

A aquisição dos sinais foi realizada por uma placa de aquisição de dados A/D, juntamente com o software *National Instruments LabVIEW 7.1*. Os sensores fornecem os sinais de emissão acústica e potência da máquina ao longo do tempo de todos os ensaios. O software *Mathworks MatLab* foi utilizado para tratar os gráficos gerados durante os experimentos e obter os valores médios apresentados.

O sensor utilizado para aquisição de dados de emissão acústica foi posicionado próximo no cabeçote móvel sobre a mesa da máquina retificadora, próximo ao contraponto e próximo à peça. O sensor piezelétrico foi ligado a um módulo de processamento de EA SENSIS DM42, com aquisição de sinal RMS.

4.4 Variáveis de saída

4.4.1 Rugosidade

A medição da rugosidade (R_a e R_z) foi realizada com o rugosímetro Taylor Hobson Surtronic³⁺, com medidas perpendiculares à superfície retificada, com *cut-off* de 0,25 mm e percurso total de 1,25 mm. Para essa etapa, foram realizadas dez medidas equidistantes para cada corpo de prova e os resultados representam médias e desvios-padrão.

4.4.2 Desvios de circularidade

Os valores do desvio de circularidade foram obtidos através de um medidor Taylor Hobson Talyrond 31C, com três medições equidistantes ao longo da espessura de cada corpo de prova. Os resultados correspondem à média das leituras de cada peça, juntamente com os desvios-padrão.

4.4.3 Microdureza Vickers

Para a medição da microdureza das amostras foi utilizado o equipamento Mitutoyo MicroWizhard. De acordo com a norma ASTM E140, o valor da carga adequada para a análise e medição da indentação realizada na amostra é obtido no momento em que uma impressão no formato de um losango regular é atingida, cuja diagonais podem ser mensuradas. A carga solicitada foi de 300 g, onde se obtém melhor visualização da indentação.

Para cada peça analisada, realizaram-se cinco medições de microdureza, conforme a norma ASTM E384, sendo profundidade da superfície da peça, e o espaçamento entre as impressões o valor da maior diagonal multiplicada por dois, resultando assim em profundidades progressivas de 60 μm , 120 μm , 180 μm , 240 μm e 300 μm na seção transversal, a partir da superfície usinada.

4.4.4 Tensão residual

No Laboratório de Análise de Tensões (LAT/UFF), as tensões residuais das amostras foram analisadas por difração de raios-X nas direções longitudinal (L) e transversal (T), no ponto indicado na Figura 12. O equipamento analisador de tensões *XStress3000* foi utilizado, com os parâmetros apresentados na Tabela 2.

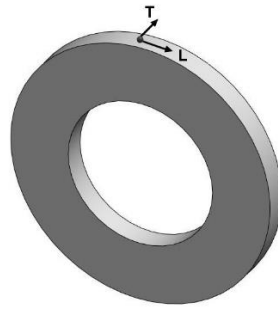


Figura 12: Região de análise das tensões residuais nas amostras.

Tabela 2: Parâmetros utilizados no sistema de análise das tensões residuais.

Diâmetro do Colimador (mm)	2
Ângulo de incidência (2θ)	$156,41^\circ$
Plano de difração {hkl}	{211}
Radiação	$\text{CrK}\alpha$
Comprimento de onda (λ) $\text{CrK}\alpha$	$2,291 \text{ \AA}$
Corrente (mA)	4,0
Tensão (KV)	25
Inclinação ψ	$0^\circ; 18^\circ; 27^\circ; 33^\circ; 45^\circ$
Tempo de exposição (s)	5

O *software* do analisador de tensões determina o valor da tensão, bem como a incerteza subjacente em cada local analisado.

4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A finalidade da realização da microscopia eletrônica de varredura está em observar a superfície das peças retificadas, por meio do feixe de elétrons secundários, avaliando influência dos avanços e da friabilidade dos rebolos na topografia e na qualidade das peças. Para isso, fez-se uso de ampliações mais reduzidas, pelas quais foi possível observar uma grande área superficial que tenha sido afetada pelos grãos abrasivos e não apenas sulcos ou vales (que seriam de certa forma indistinguíveis uns dos outros, para cada condição).

4.4.6 Desgaste do rebolo

O desgaste do rebolo foi marcado pela impressão de seu perfil em um cilindro de aço AISI 1020 (35 mm de diâmetro x 90 mm comprimento) laminado, com um avanço reduzido (0,25 mm/min). Na sequência, o desgaste foi mensurado pelo rugosímetro Taylor Hobson Surtronic³⁺, com auxílio do software Taylor Hobson TalyMap. É possível observar o processo de impressão do rebolo na Figura 13.

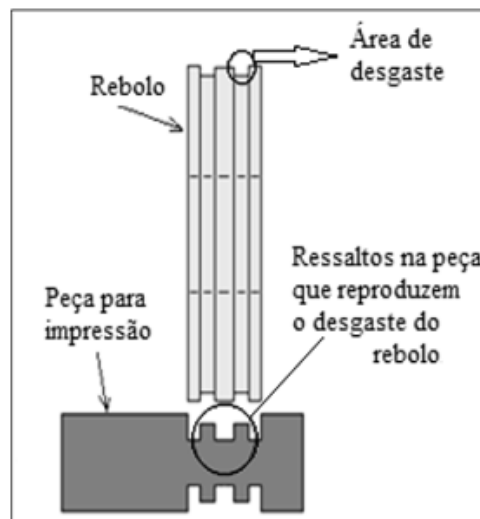


Figura 13: Esquema ilustrativo do processo: impressão do perfil do rebolo na peça

4.4.7 Emissão acústica

O módulo de aquisição SENSIS DM42 foi ligado a um bloco de conectores BNC 2110, conectado à placa de aquisição. O cabo do módulo foi conectado na placa de aquisição para se obter o sinal RMS (*root mean square*) de EA como entrada (juntamente com o sinal de potência de corte). A unidade de tratamento calcula o valor RMS do sinal em Volts e o envia à placa A/D.

4.4.8 Potência

A força tangencial de corte foi estimada pela potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo-árvore do rebolo, com o monitoramento dos valores de tensão e corrente por um módulo eletrônico Curvopower, que envia os sinais de potência à placa de aquisição.

A potência consumida está relacionada às forças de retificação, e a dimensão das forças está relacionada com os parâmetros de retificação e com a qualidade superficial do material.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Rugosidade (Ra e Rz)

Os resultados das medidas de rugosidade Ra e Rz, ambos em μm , estão apresentados nas Figuras 14 e 15, para cada rebolo de CBN (LF e HF), compondo-se de valores médios de 10 medidas equidistantes de cada uma das 3 peças retificadas, juntamente com seus desvios-padrão.

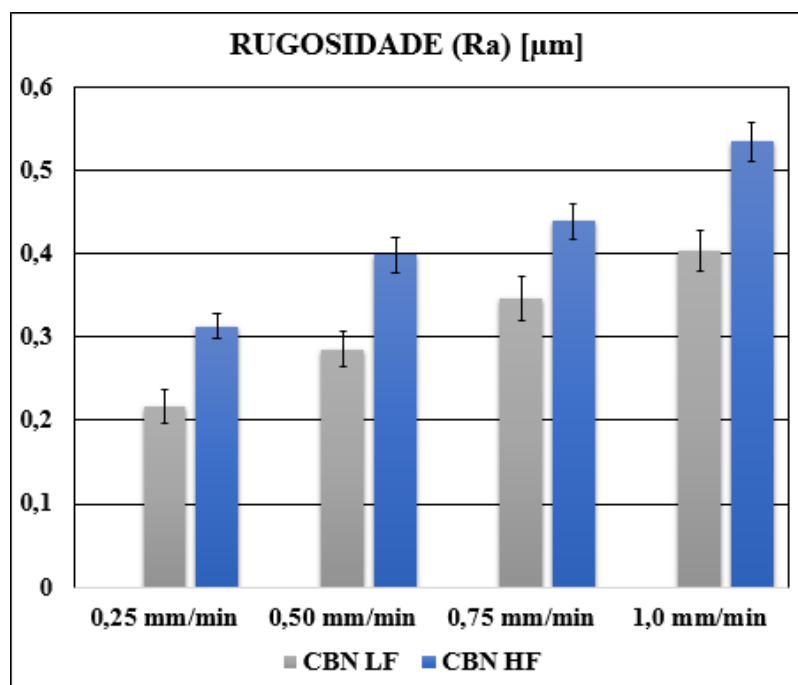


Figura 14: Rugosidade Ra [μm] para cada condição de ensaio.

Para a rugosidade média (Ra), pode-se perceber que para os dois rebolos (CBN LF e HF), o aumento do avanço contribui para o aumento da rugosidade, em virtude de ser uma operação mais agressiva, com maiores forças de corte envolvidas.

Além disso, o rebolo de alta friabilidade (HF) apresentou sempre valores de rugosidade maiores do que o rebolo de baixa friabilidade (LF). Isso pode ter se dado em virtude da elevada geração de arestas de corte durante o processo de retificação, o que leva à liberação de mais partículas abrasivas na zona de corte, que prejudicam a qualidade superficial, com a presença de

maior riscamento da superfície (maior presença de macrofratura). Os resultados de microscopia eletrônica de varredura irão corroborar com os valores de resultado.

Para o rebolo com baixa friabilidade (LF), por outro lado, a maior tenacidade dos grãos abrasivos pode ter promovido um controle mais satisfatório da geração de arestas de corte (maior presença de microfraturas), contribuindo efetivamente para a geração de uma superfície com melhor acabamento, i.e., uma menor rugosidade.

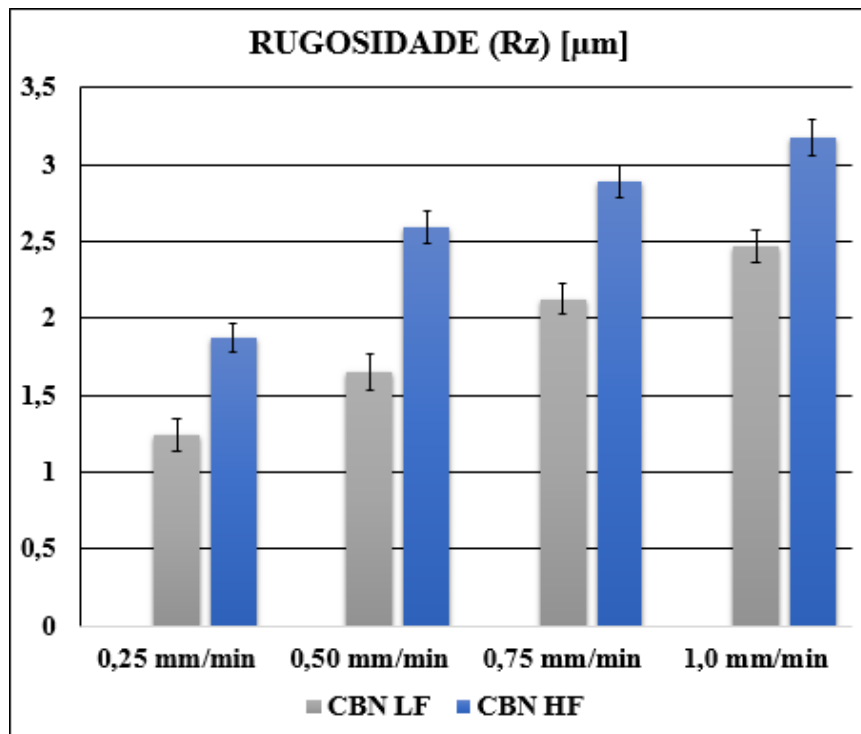


Figura 15: Rugosidade Rz [μm] para cada condição de ensaio.

Da mesma forma que para a rugosidade Ra, o parâmetro Rz (Figura 15), que representa a rugosidade máxima dos corpos de prova (maior distância entre pico e vale), comporta-se com um perfil crescente com o aumento dos avanços, tanto para o rebolo de alta friabilidade (CBN HF) quanto para o de baixa friabilidade (CBN LF). A diferença entre os dois, nesse caso, está na potencialização da geração de arestas de corte, seja pelo efeito de microfratura, macrofratura ou mesmo pela liberação de grãos inteiros na zona de corte, que se dá de maneira diferente em cada um.

Quando o rebolo possui uma tendência maior de geração de arestas de corte por macrofratura (HF), grãos e fragmentos do abrasivo podem acabar promovendo os perfis de rugosidade com mais asperidades. Por outro lado, como grão do rebolo CBN LF possui uma maior tenacidade à ruptura, suas arestas de corte permanecerão ativas por mais tempo (maior presença de microfratura), sem que haja prejuízo à superfície. É certo, porém, que um rebolo muito pouco friável pode ser deletério em função do cegamento das arestas de corte, que acabariam por deformar a superfície (ao invés de promover a efetiva usinagem), mas os valores de rugosidade obtido encontram-se dentro do aceitável para o processo de retificação, nos parâmetros estudados.

5.2 Desvios de circularidade

Os resultados dos desvios de circularidade estão apresentados na Figura 16, para cada rebolo de CBN (LF e HF), comendo-se de valores médios de 3 medidas de cada peça retificada em cada condição de usinagem, juntamente com seus desvios-padrão.

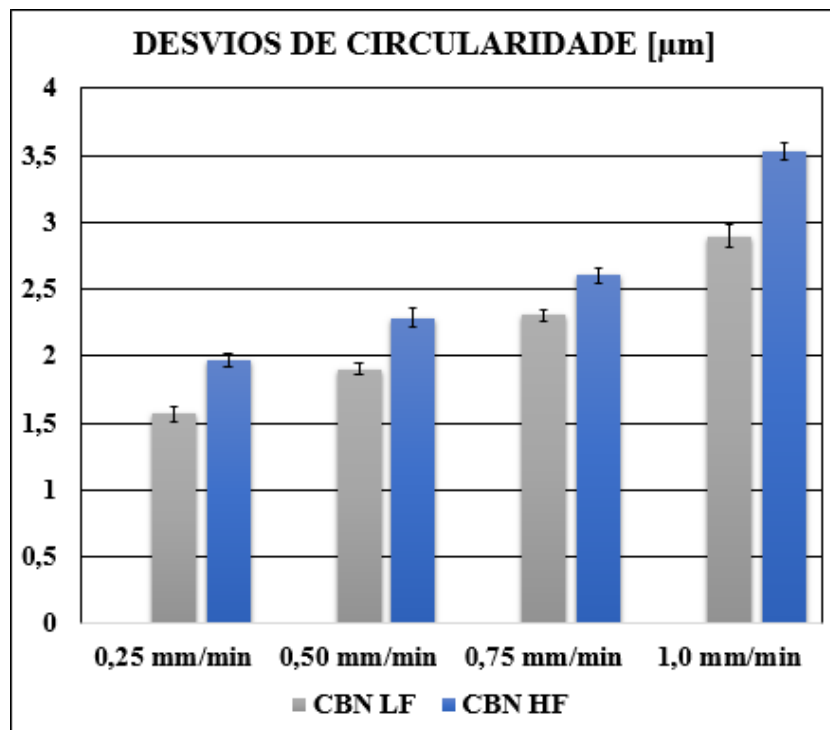


Figura 16: Desvios de circularidade [μm] para cada condição de ensaio.

Observando-se os resultados de desvios de circularidade, pode-se constatar certa similaridade com a tendência da rugosidade, sendo que os maiores avanços contribuem para um aumento significativo nos desvios de circularidade para as dadas condições de usinagem. O rebolo menos friável (CBN LF) acaba por fornecer os menores valores em comparação com o rebolo mais friável (CBN HF) para todos os avanços testados. Isso se deve ao fato de que a friabilidade maior proporciona maior geração de arestas de corte por macrofratura e liberação dos grãos abrasivos que acabam por contribuir não com o corte efetivo, mas com uma condição mais agressiva de usinagem em termos de acabamento superficial, por meio de riscamento (conforme as imagens de MEV).

Da mesma forma que os perfis de rugosidade, a maior tenacidade à fratura dos grãos abrasivos (menor friabilidade) promove um controle maior da geração de arestas de corte, com um desgaste predominante de microfraturas, que beneficia a qualidade superficial da peça retificada.

5.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (feixe de elétrons secundários) estão apresentadas a seguir, para todas as condições de usinagem de cada rebolo avaliadas. As Figuras 17 e 18 mostram as peças para a condição de avanço de 0,25 mm/min.

Buscou-se avaliar com as imagens a topografia das amostras retificadas, levando em conta a escala em que seja possível observar o efeito dos grãos abrasivos na peça, seu acabamento, ou a influência de maior ou menor riscamento na superfície, razão pela qual será feito um comparativo entre os dois rebolos, para cada condição de avanço.

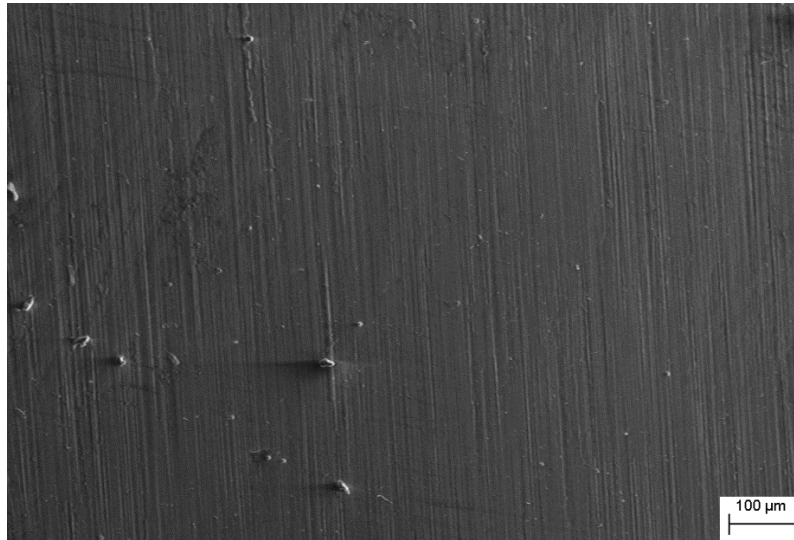


Figura 17: Peça retificada com 0,25 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.

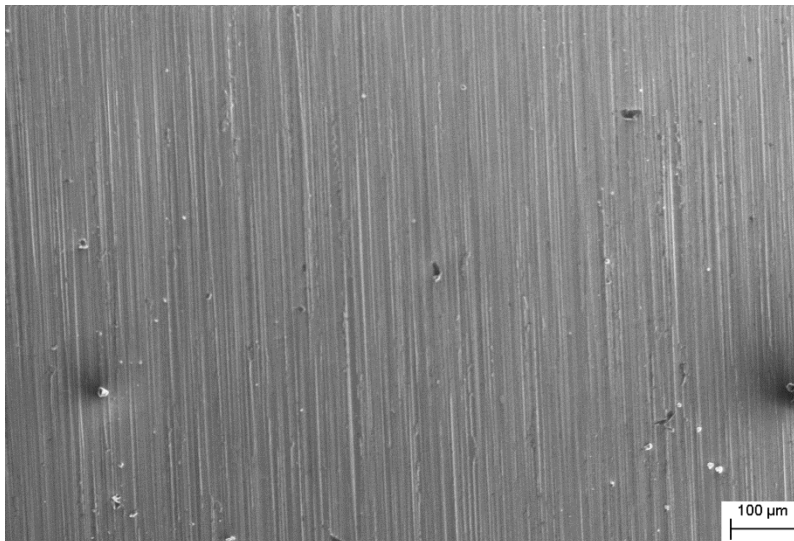


Figura 18: Peça retificada com 0,25 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.

Para a condição de avanço de 0,25 mm/min, tem-se que o rebolo com maior friabilidade (HF) promoveu um riscamento maior na superfície da peça retificada, gerado tanto pelo aumento de arestas de corte (macrofratura) quanto do particulado abrasivo liberado e suspenso no corte. Já o rebolo LF, que forneceu a menor rugosidade, possui menor riscamento (maior presença de microfratura). As Figuras 19 e 20 mostram as peças retificadas pelos dois rebolos (CBN LF e HF), respectivamente, para a condição de avanço de 0,50 mm/min.

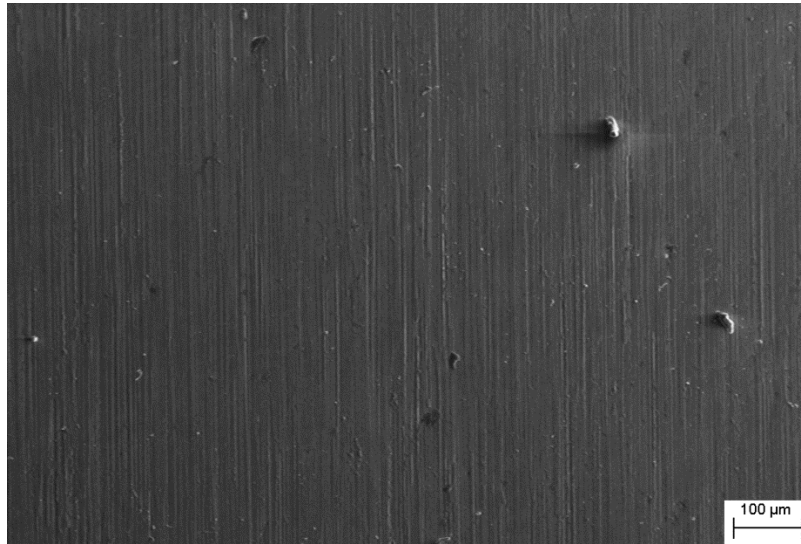


Figura 19: Peça retificada com 0,50 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.

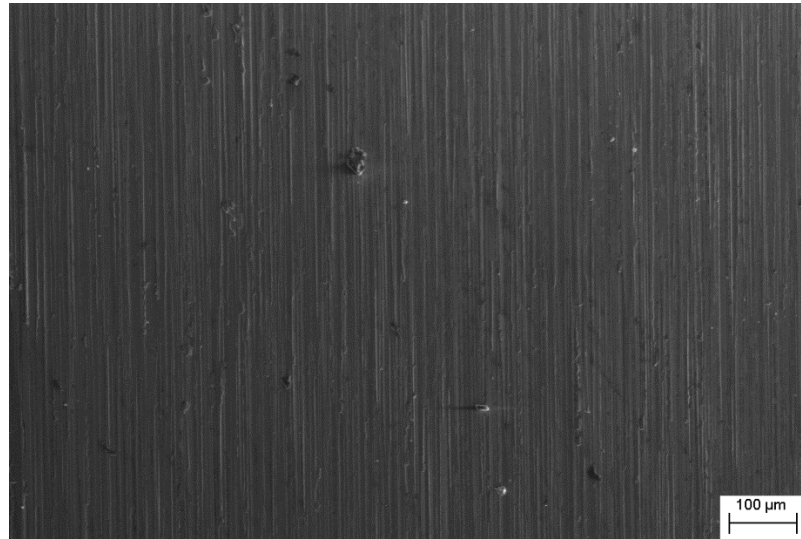


Figura 20: Peça retificada com 0,50 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.

Para a condição de avanço de 0,50 mm/min, em que as rugosidades obtidas com os dois rebolos foram maiores, ocorre um aumento do riscamento, mais acentuado por parte da peça retificada com o rebolo de maior friabilidade (HF). Além disso, pela variação das cores da imagem de elétrons secundários, nota-se a formação de picos e vales mais acentuada devido à ação de corte do abrasivo (com efeito de macrofratura, que desprende partículas maiores do rebolo).

As Figuras 21 e 22 mostram as peças retificadas pelos dois rebolos (CBN LF e HF), respectivamente, para a condição de avanço de 0,75 mm/min.

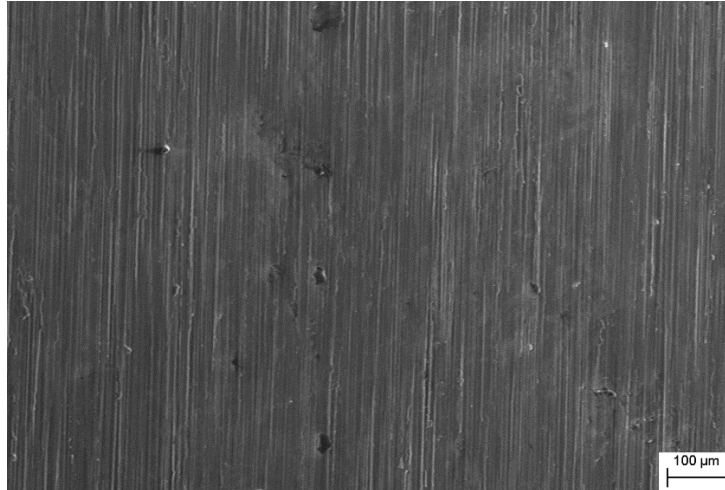


Figura 21: Peça retificada com 0,75 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.

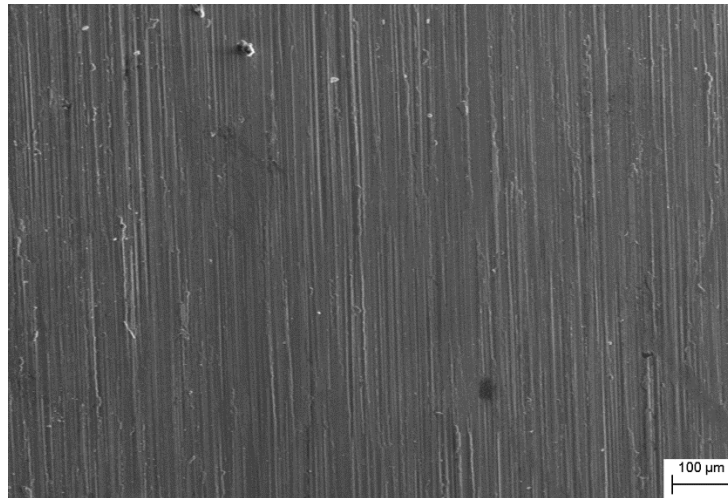


Figura 22: Peça retificada com 0,75 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.

Para a condição de avanço de 0,75 mm/min, pode-se perceber o aumento da agressividade das condições de usinagem, com a presença de sulcos e picos de rugosidade mais distintos para as duas peças (LF e HF). A topografia continua seguindo a tendência dos valores de rugosidade (R_a e R_y), com o melhor acabamento para a peça retificada com o rebolo LF, que tem menor

friabilidade, e por isso promove de maneira mais controlada o desgaste dos grãos abrasivos e a liberação de particulado abrasivo na zona de corte, por meio de microfratura.

As Figuras 23 e 24 mostram as peças retificadas pelos dois rebolos (CBN LF e HF), respectivamente, para a condição de avanço de 1,00 mm/min.

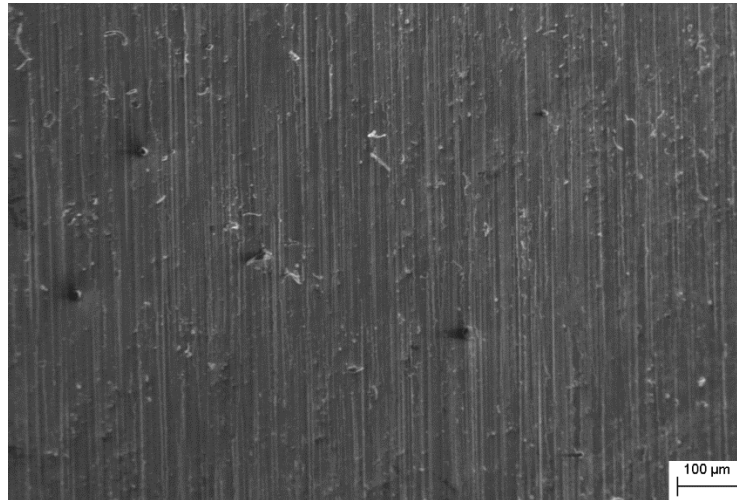


Figura 23: Peça retificada com 1,00 mm/min de avanço, para o rebolo CBN LF.

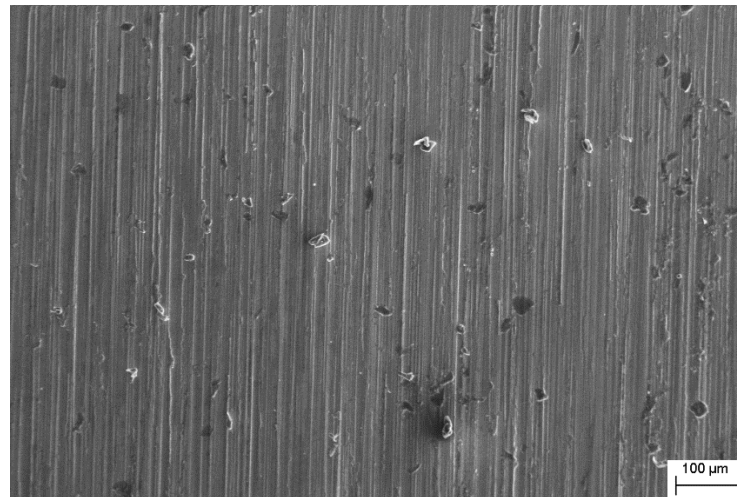


Figura 24: Peça retificada com 1,00 mm/min de avanço, para o rebolo CBN HF.

Por fim, o riscamento mais acentuado se dá na condição de avanço de 1,00 mm/min, onde a rugosidade superficial das peças já se eleva para níveis bem mais elevados. Apesar de a condição mais friável (HF) ter apresentado uma topografia mais irregular, é possível também que no rebolo

menos friável (LF), em virtude maior severidade do processo de corte, haja maior formação de arestas de corte por macrofratura e liberação de grãos inteiros na zona de corte, prejudicando assim o acabamento superficial.

5.4 Tensão residual

Os resultados das análises de tensões residuais (em MPa) estão apresentados a seguir (Figuras 25 e 26), compondo-se de valores de tensão residual nas direções longitudinal (L) e transversal (T), com os respectivos desvios-padrão.

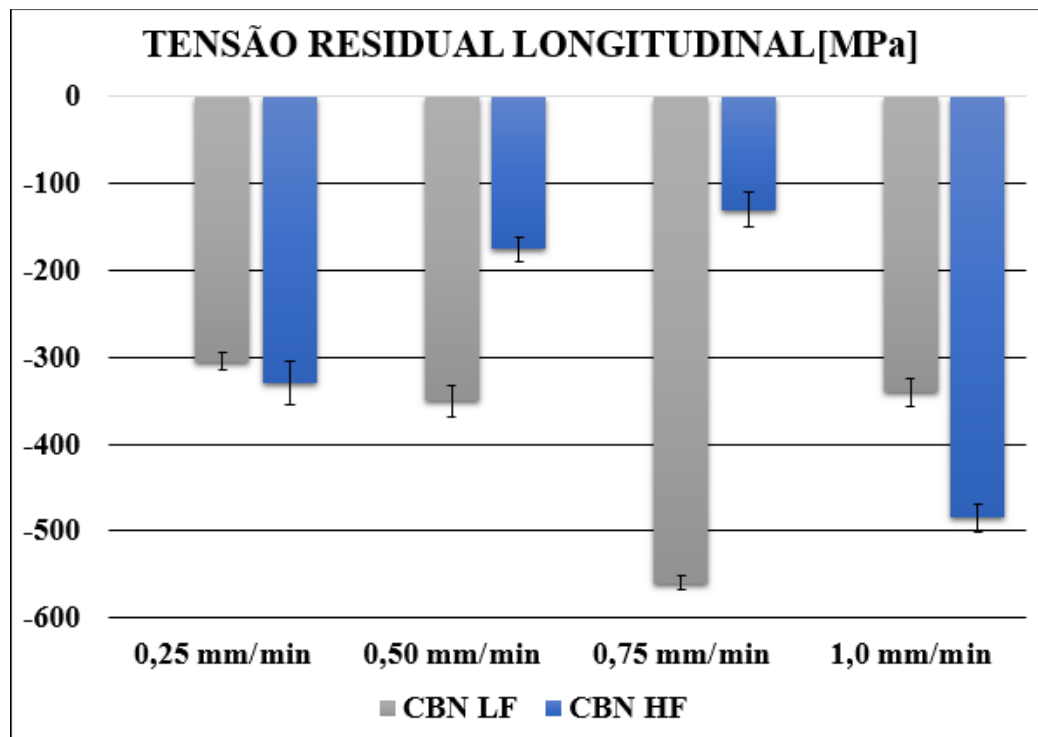


Figura 25: Tensões residuais longitudinais [MPa] para cada condição de ensaio

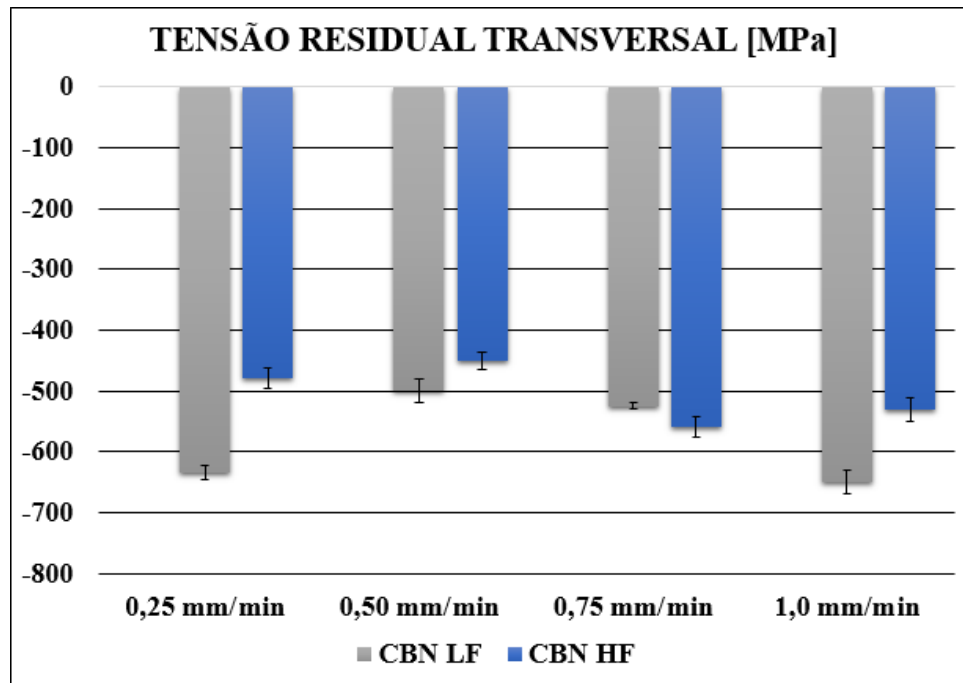


Figura 26: Tensões residuais transversais [MPa] para cada condição de ensaio.

A tensão longitudinal (na direção do corte) para o rebolo de CBN LF aumenta com o avanço, em virtude de a baixa friabilidade (menor geração de arestas de corte), contribuir com a compressão da superfície pelo rebolo, por meio do cegamento dos grãos abrasivos. Essa elevação ocorre até o avanço de 0,75 mm/min. Quando o corpo de prova é retificado com um avanço de 1,00 mm/min, por exemplo, devido à severidade da condição de usinagem, os grãos podem começar a ser arrancados da matriz do rebolo, além de ocorrer um aumento da fratura.

Diferentemente do rebolo LF, no rebolo HF (de alta friabilidade), as tensões residuais longitudinais decresceram com o aumento do avanço. Por ser um procedimento que torna a retificação uma operação cada vez mais agressiva, os grãos (de baixa tenacidade) passam a gerar mais arestas de corte no rebolo (além de ocorrer mais macrofratura), diminuindo assim a sua ação como gerador de tensões compressivas na superfície dos corpos de prova. Para a condição de 1,00 mm/min, por outro lado, o avanço pode ter atingido um estágio de tal severidade que mesmo com a elevada taxa de geração de arestas de corte é possível obter tensões compressivas na superfície.

Com relação às tensões transversais, tem-se que quase sempre as tensões do rebolo HF são inferiores às do rebolo LF (Figura 26), por conta da elevada geração de arestas de corte que a friabilidade promove, devido à macrofratura e a liberação de partículas abrasivas na zona de corte, diminuindo as tensões compressivas sobre a peça.

Além disso, a geração de tensões compressivas (e não trativas) indica que não houve danos ao processo, como queimas e alterações microestruturais (CHEN et al., 2002).

5.5 Desgaste do rebolo

Os resultados de desgaste radial do rebolo estão apresentados na Figura 27 para cada rebolo de CBN (LF e HF), compondo-se de valores médios de 5 medidas de cada cilindro de impressão de desgaste em cada condição de usinagem, juntamente com seus desvios-padrão.

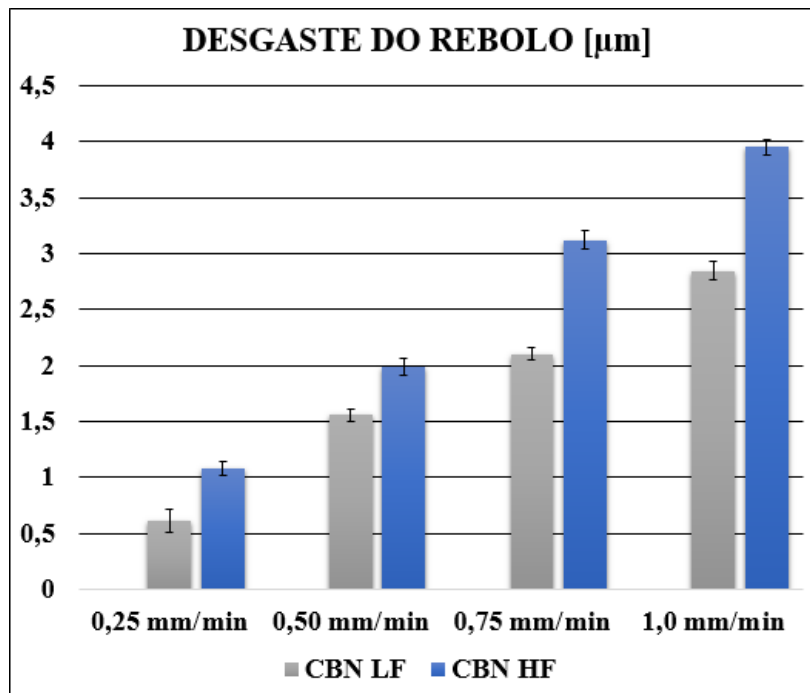


Figura 27: Desgaste dos rebolos [µm] para cada condição de ensaio.

Condizente com o esperado teoricamente, dado o conceito de friabilidade, os rebolos possuem um desgaste mais acentuado com o aumento do avanço, tanto para o mais friável (HF) quanto para o menos friável (LF), em virtude do progressivo aumento da severidade de usinagem, com maiores forças de corte envolvidas. Além disso, o rebolo mais friável, por sua menor tenacidade à fratura, tende a desgastar-se mais intensamente, tanto liberando fragmentos abrasivos maiores dos grãos ativos (efeito de macrofratura) para geração de mais arestas de corte, quanto liberando grãos inteiros. Para cada condição de usinagem, o rebolo LF conseguiu manter um desgaste do rebolo menor do que o HF (predominância de microfratura), o que pode ser decisivo na escolha de um rebolo para determinada condição.

5.6 Emissão acústica

Os resultados de emissão acústica RMS estão apresentados na Figura 28 para cada rebolo de CBN (LF e HF), compondo-se de valores médios de 3 medidas de cada ensaio em cada condição de usinagem, juntamente com seus desvios-padrão.

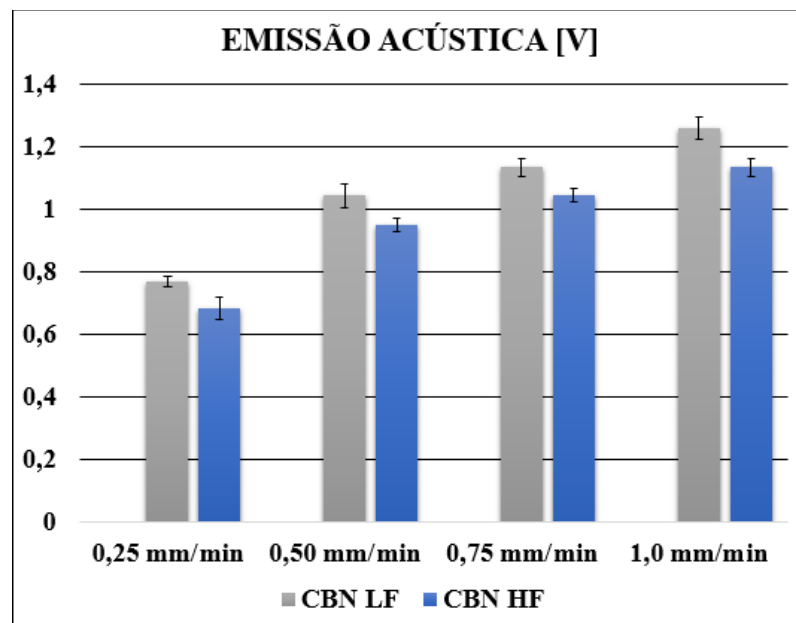


Figura 28: Sinais de emissão acústica [V] para cada condição de ensaio.

De acordo com a figura acima, pode-se constatar que o aumento no avanço provoca um aumento proporcional nos sinais de emissão acústica (diretamente relacionados às forças de corte), possivelmente em virtude do maior número de arestas de corte ativa. Para cada condição de avanço, o rebolo de menor friabilidade (LF) promoveu maiores sinais de emissão acústica em comparação com o HF. Como há uma maior tenacidade à fratura para esse rebolo, que oferece maior resistência à fratura, os grãos tendem a perder as suas arestas de corte, desgastando-se de maneira mais controlada (mais microfratura) e aumentando assim a força de corte. No caso do rebolo CBN HF, que se desgasta com mais facilidade (predomínio de macrofratura), liberando particulado abrasivo e mesmo grãos inteiros, os esforços por grão tendem a ser menores, para cada condição.

5.7 Potência

Os resultados de potência estão apresentados na Figura 29 para cada rebolo de CBN (LF e HF), compondo-se de valores médios de 3 medidas de cada peça retificada em cada condição de usinagem, juntamente com seus desvios-padrão.

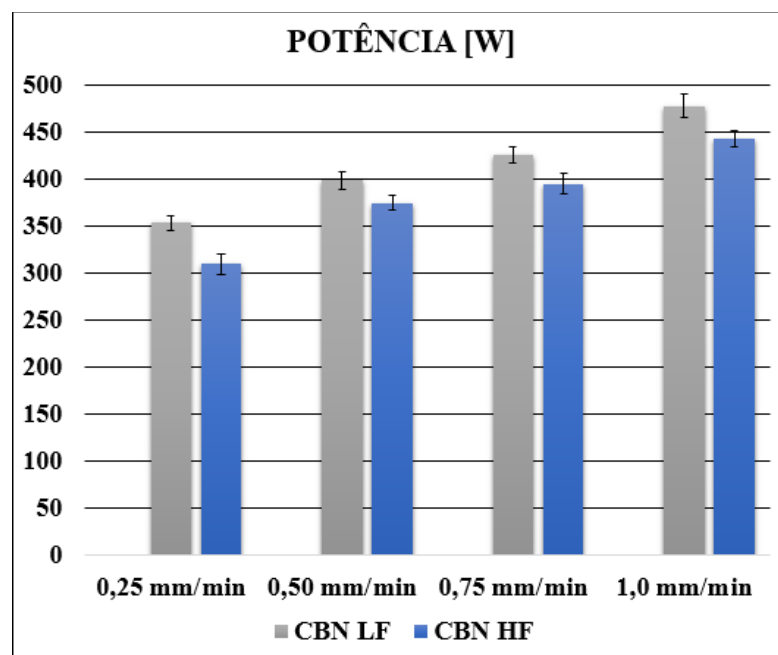


Figura 29: Sinais de potência [W] para cada condição de ensaio.

Os sinais de potência de corte comportam-se similarmente aos sinais de emissão acústica, aumentando com o aumento no avanço. O rebolo HF, que possui maior tendência à fratura e o rompimento de seus grãos (macrofratura), solicita menos o rebolo para que o corte seja efetuado, razão pela qual para todos os avanços o valor de potência consumida é menor do que para o rebolo de menor friabilidade (LF), onde há mais microfratura. Como seus grãos oferecem maior resistência à quebra (maior tenacidade), a potência consumida pelo eixo do rebolo tende a ser maior. Essa consideração energética também tem muita relevância na tomada de decisão sobre o melhor tipo de rebolo para cada aplicação, haja vista sua direta influência no custo agregado do processo.

5.8 Microdureza Vickers

Os resultados de microdureza Vickers das peças retificadas estão apresentados na Figura 30, compondo-se de valores médios de 3 medidas de cada peça retificada em cada condição de usinagem, nas profundidades de 60 μm , 120 μm , 180 μm , 240 μm e 300 μm , juntamente com seus desvios-padrão.

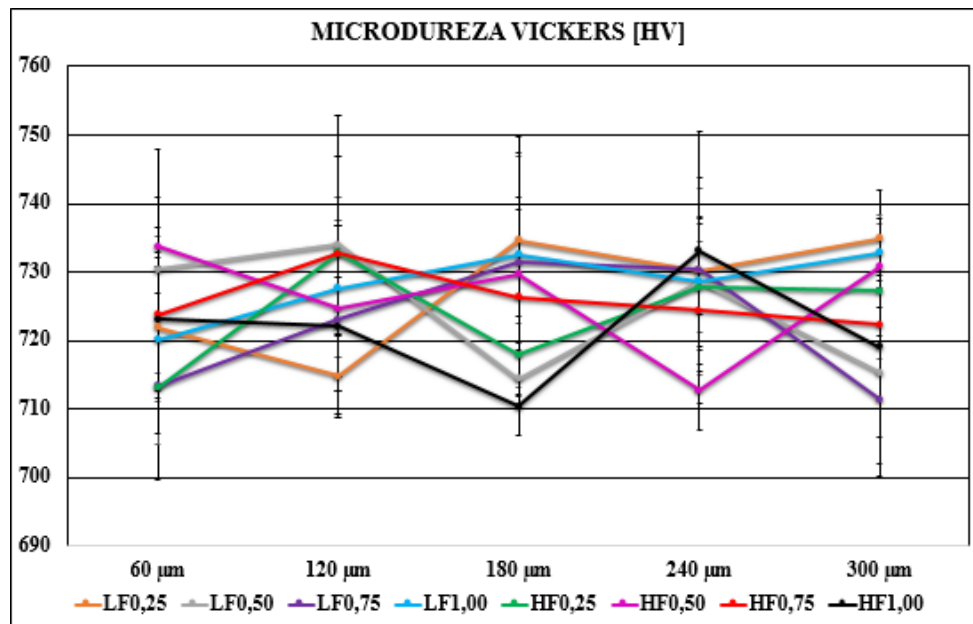


Figura 30: Microdureza Vickers [HV] para cada condição de ensaio

Com os resultados da Figura 30, pode-se constatar que não houve a presença de quaisquer danos térmicos à peça, resultantes de reaustenitização local ou queimas, que tenderiam a afastar os valores de microdureza Vickers daqueles especificados para o material em questão (AISI 4340, 58 ± 2 HRc, 717 ± 48 HV), para quaisquer dos rebolos (CBN LF e HF) ou avanços estudados.

5.9 Discussão

De uma maneira geral, os resultados puderam demonstrar o efeito que a friabilidade do rebolo, para as condições de usinagem estudadas, provoca tanto no acabamento das peças retificadas, quanto nas variáveis do processo.

No primeiro caso, a friabilidade excessiva é responsável por promover uma superfície sempre mais rugosa (rugosidades Ra e Rz), com mais irregularidades na peça (desvios de circularidade), sem comprometer a integridade do material (microdureza Vickers), por causa da maior incidência de riscamentos (microscopia eletrônica de varredura). Em razão do predomínio da macrofratura, esse riscamento mais acentuado pode ser oriundo da elevada dispersão de abrasivo na zona de corte, que, ao invés de contribuir para o efetivo corte e acabamento, acaba por prejudicar a qualidade superficial.

Com relação às variáveis de monitoramento, a friabilidade mais alta libera mais abrasivos (predomínio de macrofratura) e mesmo grãos inteiros (aumento no desgaste do rebolo), mas reduz as forças de corte (emissão acústica) e o consumo de energia (potência). A alta ou baixa friabilidade também afeta as tensões na peça à medida que os avanços aumentam (tensão residual), sem deixar de fornecer tensões compressivas à superfície.

CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou a influência da friabilidade de dois rebolos de CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340. Os resultados obtidos demonstram que, para as condições de usinagem estudadas, o rebolo de menor friabilidade (CBN LF) fornece melhor acabamento para a peça, em termos de rugosidade e desvios de circularidade, com menor desgaste de rebolo, quando comparado com o CBN HF, para todos os avanços. Todavia, seu consumo de potência e seus sinais de emissão acústica são sempre mais elevados. Os resultados de microdureza Vickers e tensões residuais mostraram que o processo de usinagem não alterou a microestrutura das peças retificadas. A elevada friabilidade (CBN HF), de um modo geral, aumentou o riscamento e deteriorou a qualidade superficial das peças, além de desgastar mais o rebolo, mas reduz a intensidade dos sinais de emissão acústica e o consumo de potência. Deve-se levar em conta todos os fatores à disposição para efetuar a melhor escolha de rebolo e sua friabilidade para determinada aplicação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho buscou iniciar os estudos envolvendo a variação da friabilidade dos rebolos no processo de retificação, devido a uma necessidade industrial (Saint-Gobain Abrasivos) e científica (escassez de literatura). Para tanto, apenas algumas condições foram escolhidas.

Para se ampliar o número de resultados, pode-se buscar variar os materiais da peça (ao invés de aços endurecidos) para ver se o comportamento se repete, ou se os parâmetros sofrem alteração significativa nas suas tendências. Além disso, pode-se testar novas composições de reboło, com variação na própria friabilidade (intermediárias) bem como com novos ligantes (resinoides ou metálicos).

Ainda mais, devido ao maior riscamento do reboło de maior friabilidade, pode-se buscar melhorar ou modificar o processo de lubrificação, estudando alternativas como a mínima quantidade de lubrificante (MQL) ou processos que envolvam maiores pressões na região de corte, ou composições diferentes de fluidos de corte.

Em suma, há uma ampla gama de parâmetros que podem ser estudados, a fim de colaborar com os resultados obtidos no presente trabalho para uma melhor compreensão do assunto.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK. **Nondestructive Inspection and Quality Control**, v. 17. pp. 89-128, ASM International, Metals Park, OH, 1989.

ASTM E140. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinnell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ASTM E384. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2011.

AURICH J.C., B. LINKE, B., HAUSCHILD, M., CARRELLA. M., KIRSCH, B. Sustainability of abrasive processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, pp. 653-672, 2013.

AYUBI, M.A., MOHAMED, A.B., ESA, A.H. In-line inspection of roundness using machine vision. **Procedia Technology**, v. 15, pp. 808-817, 2014.

BABEL, R., KOSHY, P., WEISS, M. Acoustic emission spikes at workpiece edges in grinding: Origin and applications. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 64, pp. 96-101, 2013.

BADGER, J. Factors affecting wheel collapse in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 307-310, 2009.

BASERI, H., REZAEI, S.M., RAHIMI, A., SAADAT, M. Analysis of the disc dressing effects on grinding performance – part 1: simulation of the disc dressed wheel surface. **Machining Science and Technology**, v.12-2, pp.183–196, 2008.

BIANCHI, E. C., MONICI, R. D., NETO, L. D., AGUIAR, P. R., GUERMANDI, L. G. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinoide e vitrificado. **Cerâmica**, v.57, n. 344, São Paulo, 2011.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; SILVA, E. J.; AGUIAR, P. R; VALARELLI, I. D. Análise do Comportamento da Microestrutura de Materiais endurecidos retificados com rebolos de CBN. **Materials Research**, v. 3, n. 4, 2000.

BIGERELLE, M., HAGEGE, B., EL MANSORI, M. Mechanical modeling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding. **Tribology International**, vol. 41, pp. 992-1001, 2008.

- BRINKSMEIER, E., GARBRECHT, M., HEINZEL, C., KOCH, T. H., ECKEBRECHT, J. Current Approaches in Design and Supply of Metalworking Fluids, **Tribology Transactions**, v. 52, pp. 591-601, 2009.
- BRINKSMEIER, E., PETERS, J., KÖNIG, W. Residual Stress – Measurement and causes in machining processes, **Annals of the CIRP**, v. 3, n. 2, 1982.
- CHEN, M. C. Roundness measurements for discontinuous perimeters via machine visions. **Computers in Industry**, v. 47, pp. 185-197, 2002.
- CHEN, X., ROWE, W.B., CAI, R. Precision grinding using CBN wheels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 42-5, pp. 585-593, 2002.
- DENKENA, B., GROVE, T., BREMER, I., BEHRENS, L. Design of bronze-bonded grinding wheel properties. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 333-336, 2016.
- FIELD, J.E., FREEMAN, C.J. Strength and fracture of diamond. **Philosophical Magazine**, v. 43-6, pp.595–618, 1981,
- HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, pp. 755-761, 2003.
- JACKSON, M. J., HITCHINER, M. P. Abrasive Tools and Bonding Systems. In: JACKSON, M. J. e DAVIM, J.P., **Machining with abrasives**, pp. 1-77, 2011.
- KARPUSCHEWSKI, B. Sensor for physical properties. In: TÖNSHOFF. H.K.; INASAKI, I. **Sensors in Manufacturing Vol.1**. Wiley-VCH. pp. 123-142, 2001.
- KING, R. I., HAHN, R. S. **Handbook of Modern Grinding Technology**. Chapman and Hall, 3 Ed., pp.119-167, 1992.
- KLOCKE, F. **Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping**. Ed. Springer, p. 433, 2009.
- KOPAC, J., KRAJNIK, P. High-performance grinding – A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, pp.278-284, 2006.
- KUMAR, S., YADAV, M., AGRAWAL, P., KHAN, M. Z., VASHISTA, M. Assessment of Microhardness Profile in Grinding Using Barkhausen Noise Technique at Various Analysis Parameters. **ISRN Materials Science**, v. 2011, pp. 1-6, 2011.
- LIAO, T. W., ZHANG, Z. M., MOUNT C. R. A case based reasoning system for identifying failure mechanisms. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 13, n. 2, pp. 199-213, 2000.

LINDSAY, R. **Fundamental of Precision Production Grinding**. SME Society of Manufacturing Engineers, Detroit, 1999.

LINKE, B. A review on properties of abrasive grits and grit selection. **International Journal of Abrasive Technology**, v. 7, n.1, pp. 46–58, 2015.

MALKIN, S. Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage, In: MALKIN, S. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**, 2^a Ed. Chichester: Ellis Horwood Limited, 2008.

MALKIN, S., GUO, C. Thermal Analysis of Grinding, **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 56, pp. 760-782, 2007.

MAO, C., ZHOU, Z. X., REN, Y. H., ZHANG, B. Analysis and FEM Simulation of Temperature Field in Wet Surface Grinding, **Materials and Manufacturing Processes**, v. 25, n. 6, pp. 399-406, 2010.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B., INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. Taylor & Francis Group, 2007.

MARINESCU, I. D., ROWE, W.B., DIMITROV, B., INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**. 2^a Ed. Norwich, William Andrew Inc, 2013.

MARINESCU, I., TONSHOFF, H. K., INASAKI, I. Deformation and fracture of ceramics materials. In: **Handbook of Ceramic Grinding and Polishing**, New Jersey: William Andrew Publishing/Noyes, 2007.

MOIA, D.F.G., THOMAZELLA, I.H., AGUIAR, P.R., BIANCHI, E.C., MARTINS, C.H.R., MARCHI, M. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, pp. 627-640, 2015.

NUSSBAUM, G. CH. **Rebolos e Abrasivos - Tecnologia Básica, Vol.: I, II e III**. Livraria e Editora Jacomo Ltda, 1988.

PUERTO, P., FERNÁNDEZ, R., MADARIAGA, J., ARANA, J., GALLEGO, I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, v. 63, pp. 174-182, 2013

REN, Q., BALAZINSKI, M., BARON, L., JEMIELNIAK, K., BOTEZ, R., ACHICHE, S. Type-2 fuzzy tool condition monitoring system based on acoustic emission in micromilling, **Information Sciences**, v. 255, pp. 121-134, 2014.

- REN, Y.H., ZHANG, B., ZHOU, Z. X. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.58, pp. 299-302, 2009
- ROWE W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. Elsevier, Second Edition, 2014.
- SALMON, S. C. **Modern Grinding Process Technology**. MacGraw-Hill, 1992.
- SILVA L.R., CORRÊA E.C.S., BRANDÃO, J.R., DE ÁVILA, R.F. Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, 2013
- SILVA, L.R., BIANCHI, E.C., FUSSE, R.Y., CATAI, R.E., FRANC, T.V., AGUIAR, P.R. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, pp. 412-418, 2007
- STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**, 2^a Ed., 2006.
- TAWAKOLI, T., HADAD, M.J., SADEGHI, M.H., DANESHI, A., STOCKERT, S., RASIFARD, A. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 49, pp. 924-932, 2009
- TÖNSHOFF, H. K., LIERSE, T., INASAKI, I. Grinding of advanced ceramics. In: JAHANMIR, S., RAMULU, M., KOSHY, P. **Machining of Ceramics and Composites**, Marcel Dekker, p. 109, 1999.
- WEBSTER, J., TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. v. 53, pp. 597-617, 2004
- WECK, M., HENNES, N., SCHULZ, A. Dynamic Behavior of Cylindrical Traverse Grinding Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 50, pp. 213-216, 2001.
- YOUSSEF, H.A.; EL-HOFY, H. **Machining Technology: Machine Tools and Operations**, CRC Press, 2008.