UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALEX CAMILLI BOTTENE

Método Inovador para Texturização de Rebolos

São Carlos

2012

ALEX CAMILLI BOTTENE

Método Inovador para Texturização de Rebolos

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Manufatura

Orientador: Professor Titular João
Fernando Gomes de Oliveira

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE
DA VERSÃO CORRIGIDA. A
VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECÂNICA
DA EESC-USP

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B751m Bottene, Alex Camilli
Método inovador para texturização de rebolos. /
Alex Camilli Bottene; orientador João Fernando Gomes de
Oliveira. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2012.

1. retificação. 2. dressagem. 3. desgaste. 4.
vibrações de máquinas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALEX CAMILLI BOTTENE**.

Título da dissertação: "Método inovador para texturização de rebolos".

Data da defesa: 23/11/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **João Fernando Gomes de Oliveira (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Eraldo Jannone da Silva**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Anselmo Eduardo Diniz**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

EESCUSP
Serviço de Pós-Graduação
Protocolado em 23/11/2012

DEDICATÓRIA

A meus queridos mestres e pais,
Noedi e Ana, minha segunda mãe
vovó Luiza e meu amor Aline.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por proporcionar saúde para chegar até aqui e luz para me guiar perante os desafios encontrados.

Ao meu orientador, Prof. Titular João Fernando Gomes de Oliveira, por confiar a mim o desenvolvimento deste trabalho, paciência e total apoio durante a realização e também amizade e motivação.

Ao Dr. Thiago Valle França pelo companheirismo, amizade e dedicação no desenvolvimento em conjunto deste trabalho.

Aos docentes do Departamento de Engenharia de Produção da EESC-USP que auxiliaram diretamente no desenvolvimento deste trabalho, Prof. Titular Reginaldo Teixeira Coelho e Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva.

Ao Prof. Rodrigo Nicoletti, por acreditar neste trabalho e fornecer embasamento teórico e prático na possível aplicação do método desenvolvido.

Aos integrantes do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação - LOPF, por fornecer apoio e. Em especial ao técnico Adolfo Ferrarin que auxiliou as etapas experimentais.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP por conceder auxílio no desenvolvimento inicial deste trabalho e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão de bolsa de mestrado.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

A minha noiva Aline, meu amor e fonte de inspiração que tornaram este trabalho realidade.

RESUMO

BOTTENE, A.C. **Método inovador para texturização de rebolos**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

A retificação representa o processo mais utilizado na usinagem de peças para obtenção de altos níveis de qualidade superficial, dimensional e produtividade. Uma importante etapa da retificação consiste na preparação e condicionamento do rebolo para o corte, a dressagem. Durante a dressagem, a superfície da ferramenta de corte é alterada para obtenção de arestas cortantes de acordo com as especificações desejadas. O objetivo deste trabalho é desenvolver um método para inscrição de texturas na superfície do rebolo que proporcionem melhores condições de corte durante a retificação e, também, possibilite utilizar a retificação como processo para texturização superficial de peças. O método desenvolvido consiste em alterar controladamente a profundidade de dressagem utilizando um excitador eletromecânico fixado na base do dressador de uma retificadora cilíndrica CNC. A movimentação é controlada por um software desenvolvido para sincronizar o deslocamento longitudinal do dressador com ondas senoidais enviadas ao amplificador operacional do excitador. Desta forma, o dressador proporciona inscrição de texturas no rebolo durante a dressagem. . O método foi experimentalmente avaliado e sua funcionalidade foi comprovada. Texturas diversas foram inscritas na superfície do rebolo, com até 15µm de profundidade. Com o uso da texturização de rebolos foi possível obter redução de até 20% da potência específica de corte, sem perda representativa da qualidade final da peça (rugosidade e cilindricidade) e mantendo a vida da ferramenta de corte, em comparação com retificação convencional. Em complemento, o método possibilitou criação de diversos padrões de texturas nas superfícies de peças retificadas, possibilitando utilizar a retificação como um processo de usinagem para este fim.

Palavras-chave: retificação, dressagem, desgaste, vibrações de máquinas.

ABSTRACT

BOTTENE, A.C. **Inovative method for grinding wheel texturing**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Grinding represents the most applied machining process to achieve best combination of surface and dimensional quality, also productivity. One important stage of the grinding process is to prepare and condition the grinding wheel surface for the cutting, the dressing operation. During the dressing, wheel surface is changed to acquire cutting specification required for the operation. The objective of this work is develop a method to texturing the grinding wheel surface for better grinding performance and, also, texturing of surfaces through normal grinding cutting. The method controlled changes the dressing depth using an electro-mechanical actuator fixed to the dressing tool base of a CNC grinding machine. The displacement of the dressing tool is controlled using the developed software. It is able to synchronize the longitudinal movement with generated sine waves sent to the operational amplifier of the actuator. Through this movement and control, the dressing tool is able to texture the grinding wheel. The method was experimentally evaluated and it's functionally proved. It is possible to inscribe different texturing patterns in the wheel surface, with depth up to 15 μ m. Using texturized wheels, is possible to reduce up to 20% the grinding power, without representative losses with the machined workpiece quality (roughness and roundness) and tool life, compared to regular grinding. In addition, it is possible to transfer different textures patterns to the workpiece surface while cutting, enabling grinding s a machining process to produce workpiece patterns.

Keyword: grinding, dressing, wear, machine vibrations.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – TÍPICO DESGASTE DE DRESSADORES - VARIAÇÃO DA LARGURA DE DRESSAGEM (B_D).	15
FIGURA 1.2 – REBOLOS DESENVOLVIDOS POR (KIM, KANG, <i>ET AL.</i> , 1997) E (LEE, WONG E ZHANG, 2000) PARA RETIFICAÇÃO DE MATERIAIS DIFÍCEIS DE RETIFICAR - ADAPTADA.	16
FIGURA 1.3 – SUPERFÍCIE TEXTURIZADA DESENVOLVIDA PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DE MANCAIS AXIAIS AERODINÂMICOS (HASHIMOTO E OCHIAI, 2008) - ADAPTADA.	17
FIGURA 2.1 – OPERAÇÕES DE RETIFICAÇÃO SEGUNDO NORMA DIN 8589, ADAPTADA (OLIVEIRA, 1988).	20
FIGURA 2.2 – PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA TANGENCIAL DE MERGULHO.	21
FIGURA 2.3 – ESTÁGIOS PRINCIPAIS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DE MERGULHO, ADAPTADA (OLIVEIRA, 1988).	22
FIGURA 2.4 – MECANISMOS DE DESGASTE DO REBOLO ADAPTADA (MALKIN, 1989).	23
FIGURA 2.5 – CURVA DE DESGASTE RADIAL DO REBOLO EM RELAÇÃO AO VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO ADAPTADA (GRAHAM E VOUTSADOPOULOS, 1978).	23
FIGURA 2.6 – PARÂMETROS E DINÂMICA DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM.	27
FIGURA 2.7 – DRESSADORES ESTÁTICOS (WINTER ABRASIVOS BRASIL, 2003).	27
FIGURA 2.8 – DRESSADORES ROTATIVOS (WINTER ABRASIVOS BRASIL, 2003).	28
FIGURA 2.9 – SUPERFÍCIE DO REBOLO APÓS DRESSAGEM COM DIFERENTE COMBINAÇÃO DE S_D E A_D ADAPTADA (CHEN E ROWE, 1996).	29
FIGURA 2.10 – PADRÃO SUPERFICIAL GERADO EM HASTES DE VÁLVULAS RETIFICADAS.	30
FIGURA 2.11 – DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA PERDIDA EM VEÍCULOS LEVES ADAPTADA (TUNG E MCMILLAN, 2004).	33
FIGURA 2.12 – REBOLO DESENVOLVIDO POR (KIM, KANG, <i>ET AL.</i> , 1997) PARA RETIFICAÇÃO DE MATERIAIS DTG, ADAPTADA.	35
FIGURA 2.13 – MONTAGEM DESENVOLVIDA POR (OLIVEIRA E DORNFELD, 2001), ADAPTADA.	36
FIGURA 2.14 – PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DO MAPA ACÚSTICO, ADAPTADA (OLIVEIRA E DORNFELD, 2001).	37
FIGURA 2.15 – RESULTADOS DE MONITORAMENTO POR MAPEAMENTO DE EMISSÃO ACÚSTICA, ADAPTADA (OLIVEIRA E DORNFELD, 2001).	38
FIGURA 3.1 – METODOLOGIA PROPOSTA PARA TEXTURIZAÇÃO DE PEÇAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.	39
FIGURA 3.2 – METODOLOGIA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS – ETAPA 1.	41
FIGURA 3.3 – METODOLOGIA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS – ETAPA 2.	42
FIGURA 3.4 – METODOLOGIA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS – ETAPA 3.	43
FIGURA 4.1 - SISTEMA ADOTADO PARA CONTROLE POSICIONAL DO DRESSADOR AO LONGO DO PROCESSO DE DRESSAGEM.	45
FIGURA 4.2 – INTERFACE VISUAL (FRONT PANEL) DESENVOLVIDA PARA TEXTURIZAÇÃO – VERSÃO BÁSICA. ..	47
FIGURA 4.3 – SHAKER DESENVOLVIDO PELA EMPRESA LABWORKS INC. E UTILIZADO NO SISTEMA PROPOSTO.	50
FIGURA 4.4 – MONTAGEM DO SISTEMA DE ATUAÇÃO NA RETIFICADORA CNC.	51
FIGURA 4.5 – SISTEMA ADOTADO PARA FIXAÇÃO DO SHAKER JUNTO A RETIFICADORA CNC.	52
FIGURA 4.6 – FIXAÇÃO DO DRESSADOR NA RETIFICADORA CNC UTILIZADA – ALOJADO NO CONTA-PONTO DA MÁQUINA.	53
FIGURA 4.7 – REPRESENTAÇÃO DE UMA MAPA ACÚSTICO COMUM DE DRESSAGEM.	54
FIGURA 4.8 – SISTEMA DE MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA INSTALADO NA RETIFICADORA CNC. ..	55
FIGURA 4.9 – MAPA ACÚSTICO DE DRESSAGEM CP-1.	56
FIGURA 4.10 – ANÁLISE DE CIRCULARIDADE APÓS TEXTURIZAÇÃO CP-1.	57
FIGURA 4.11 – MAPA ACÚSTICO DE DRESSAGEM CP-2.	59
FIGURA 4.12 - ANÁLISE DE CIRCULARIDADE APÓS TEXTURIZAÇÃO CP-2.	60
FIGURA 5.1 – METODOLOGIA PARA TEXTURIZAÇÃO TIPO LINEAR.	63
FIGURA 5.2 - MAPA ACÚSTICO DE DRESSAGEM, TEXTURA TIPO LINEAR.	64

FIGURA 5.3 – ANÁLISE SUPERFICIAL DA PEÇA TEXTURIZADA, CIRCULARIDADE E CILINDRICIDADE RESPECTIVAMENTE.	65
FIGURA 5.4 – METODOLOGIA PARA TEXTURIZAÇÃO TIPO RECARTEILHADO.....	66
FIGURA 5.5 – MAPA ACÚSTICO DE DRESSAGEM, TEXTURA TIPO RECARTEILHADO.....	67
FIGURA 5.6 – ÂNGULO DE FASE, VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE E POTÊNCIA DE CORTE DURANTE TEXTURIZAÇÃO SINCRONIZADA.....	68
FIGURA 5.7 – ÂNGULO DE FASE, VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE E POTÊNCIA DE CORTE DURANTE TEXTURIZAÇÃO NÃO SINCRONIZADA.....	69
FIGURA 5.8 – MAPA ACÚSTICO DE TEXTURIZAÇÃO (TEXTURAS VARIADAS).	72
FIGURA 5.9 – TEXTURIZAÇÃO DA PEÇA (TEXTURAS VARIADAS).	73
FIGURA 5.10 – AVALIAÇÃO DO GRAU DE RECOBRIMENTO NA TEXTURIZAÇÃO (TEXTURA TIPO POCKETS).	74
FIGURA 5.11 – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RELAÇÃO R IGUAL 10 E 5, RESPECTIVAMENTE.....	76
FIGURA 5.12 – DEFEITO OBSERVADO DEVIDO A <i>MULT. CONST.</i> (CONSTANTE DE ATRASO).	76
FIGURA 5.13 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FORMULAÇÃO DA RELAÇÃO R (OLIVEIRA, BOTTENE E FRANÇA, 2010).....	77
FIGURA 5.14 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM RELAÇÃO A CONDIÇÃO DE TEXTURIZAÇÃO.....	79
FIGURA 5.15 – RESULTADOS OBTIDOS PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO ATRAVÉS DO PROCESSO DE TEXTURIZAÇÃO.	81
FIGURA 5.16 – MAPAS ACUSTICO PARA AVALIAÇÃO DO DESGASTE DO REBOLO APÓS CICLOS DE RETIFICAÇÃO.	82

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1.	OBJETIVO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.....		19
2.1.	PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	19
2.1.1.	<i>Processo de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho</i>	20
2.1.2.	<i>A ferramenta abrasiva</i>	22
2.2.	DESGASTE DA FERRAMENTA ABRASIVA	22
2.2.1.	<i>Desgaste do rebolo por atrito</i>	24
2.2.2.	<i>Desgaste do rebolo por fratura do grão abrasivo</i>	25
2.2.3.	<i>Desgaste do rebolo por fratura do ligante</i>	25
2.3.	A OPERAÇÃO DE DRESSAGEM	25
2.3.1.	<i>Influência da operação de dressagem no desempenho do processo de retificação</i> 28	
2.4.	TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL	31
2.4.1.	<i>Rebolos com superfícies customizadas</i>	34
2.5.	MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO POR MAPEAMENTO COM EMISSÃO ACÚSTICA	36
3	PROPOSTA DO SISTEMA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS	39
4	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS	44
5	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA	61
5.1.	AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO ENTRE O REBOLO E A PEÇA.....	61
5.2.	AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DA METODOLOGIA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS.....	70
5.3.	INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO NO DESEMPENHO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO – APLIAÇÃO DO MÉTODO DESENVOLVIDO	77
6	CONCLUSÃO	84
7	BIBLIOGRAFIA.....	87

1 INTRODUÇÃO

O processo de retificação de precisão é o mais utilizado pela indústria metalmeccânica para a obtenção de altos níveis de qualidades geométricas, dimensionais e superficiais em lotes de peças usinadas. Porém, muito complexo e dependente de diversos parâmetros e variáveis inerentes ao processo, o que requer mão de obra altamente treinada (KOPAC e KRAJNIK, 2006) (OLIVEIRA, 1988). O processo de retificação é amplamente empregado quando se desejam melhorias dimensionais, de forma e de acabamento superficial e, ao mesmo tempo, a diminuição dos custos de produção. A retificação consiste, basicamente, em utilizar uma ferramenta de corte composta de grão, ligante e porosidade. É classificada como geometria indefinida, devido impossibilidade de determinar-se exatamente a forma, posição, ângulos e número de arestas cortantes. Esta ferramenta é denominada rebolo. A alta qualidade do processo é decorrência da baixa quantidade de material removida por cada aresta de corte presente em cada grão abrasivo. Devido à fragilidade dos grãos abrasivos, as características funcionais do rebolo devem ser restauradas periodicamente por uma operação denominada dressagem (BIANCHI, 1990). A operação de dressagem consiste em utilizar uma ferramenta para reavivamento da superfície de corte, através da remoção ou fraturamento dos grãos desgastados. O dressador é a ferramenta responsável pela usinagem da superfície do rebolo, ferramenta esta de alta dureza.

Pesquisas comprovaram a relação direta entre os parâmetros de corte utilizados no processo de dressagem e o desempenho da retificação (OLIVEIRA, 1988). A remoção de material necessária para reavivamento apresenta dois principais efeitos na superfície do rebolo, o macro e micro efeito de dressagem. O macroefeito é resultado da combinação da velocidade de dressagem (v_d) e do seu perfil. Consiste na inscrição de uma textura helicoidal resultante do deslocamento do dressador ao longo do comprimento do rebolo. O microefeito, assim chamado pela menor dimensão em relação ao outro, é resultado da fratura de ambos grãos abrasivos e ligante. A combinação destes dois efeitos proporciona o condicionamento para corte do rebolo (OLIVEIRA, 1988). Condições que proporcionem macro e micro efeito agressivos, ou com baixa densidade de arestas de corte, resultarão em uma ferramenta com superfície adequada para alta remoção de material, ou desbaste. Por outro lado, a diminuição dos efeitos condiciona a

ferramenta para baixa remoção de material, ou acabamento (CHEN e ROWE, 1996) (BIANCHI, 1990).

Esta direta relação entre as condições de dressagem e o desempenho da retificação demonstrou a necessidade de se desenvolver processos capazes de monitorar e controlar os parâmetros de dressagem de maneira a assegurar a alta qualidade da retificação. Entretanto a solução para este problema representa uma complexidade diretamente associada a também complexidade do processo de corte em si.

A combinação dos parâmetros de corte utilizados para o processo de dressagem, em especial a profundidade de dressagem (a_d), velocidade de dressagem (v_d) e a geometria da aresta de corte do dressador; determinam as características da topografia do rebolo. O controle preciso destes parâmetros garante a afiação desejada da ferramenta de corte, assegurando assim as condições de qualidade da peça final (XUE, NAGHDY e COOK, 2002) (COELHO, 1991). A complexidade no controle preciso destes parâmetros esta relacionada com a variação imprevisível da geometria do dressador. Devido desgaste sofrido pela operação de dressagem a geometria do dressador se altera de maneira aleatória, tornando o controle associado a diversos fatores de operação difíceis de serem monitorados em sua totalidade. O método empregado atualmente para superar esta barreira consiste em adotar referências de desgaste para alterar periodicamente os parâmetros de acordo com o desgaste do dressador. A Figura 1.1 representa uma visão qualitativa do padrão de desgaste de dressadores ao longo do tempo, representado pela largura de dressagem (b_d) dos principais tipos de dressadores utilizados em peças industriais.

Figura 1.1 – Típico desgaste de dressadores - variação da largura de dressagem (b_d).

Uma metodologia já desenvolvida para aumento do desempenho do processo de retificação consiste em utilizar rebolos já previamente fabricados com superfícies de corte que atendam as condições desejadas. Esta técnica foi utilizada por KIM, KANG, *et al.* (1997) e LEE, WONG e ZHANG (2000) para retificação de materiais difíceis de retificar (*difficult to grind* – DTG). Os pesquisadores desenvolveram o rebolo de maneira a assegurar uma macro-superfície descontínua de corte. Entre outras vantagens, ao utilizar este tipo de geometria as forças de corte apresentam redução e também melhor controle durante o processo de retificação. Em complemento, o processo torna-se mais rápido e mais barato (HEINZEL e RICKENS, 2009). Esta superfície foi obtida através da criação de ranhuras profundas na circunferência do rebolo. A Figura 1.2 mostra os rebolos desenvolvidos para o trabalho de (KIM, KANG, *et al.*, 1997) – referência 1 e (LEE, WONG e ZHANG, 2000) – referência 2.

Figura 1.2 – Rebolos desenvolvidos por (KIM, KANG, *et al.*, 1997) e (LEE, WONG e ZHANG, 2000) para retificação de materiais difíceis de retificar - ADAPTADA.

A superfície descontínua de corte possibilitou redução na força de corte e melhoria da qualidade da superfície usinada, além de auxiliar na remoção dos cavacos e na aplicação do fluido de corte (NAKAYAMA, TAKAJI e ABE, 1977). A metodologia provou ser funcional para atender as propriedades esperadas, porém inviável para aplicação em cenários que demandam alta produtividade. O processo necessário para produção destes rebolos especializados e a baixa vida destas geometrias tornaram a técnica financeiramente inviável para uso em ambientes fabris.

Trabalhos recentes publicados em periódicos na área de tecnologia de fabricação apresentaram avanços nas técnicas de usinagem para obtenção de superfícies texturizadas com precisão (DENKENA, BOEHNKE e KÄSTNER, 2008). Estas novas técnicas em desenvolvimento utilizam de ferramentas com geometria definida para inscrição de padrões que apresentem vantagens funcionais a peça manufaturada. BRUZZONE, COSTA, *et al.*, (2008) apresentaram levantamento dos avanços tecnológicos empregados para o desenvolvimento de superfícies texturizadas de alto desempenho. O estudo ressalta a importância da usinagem como o processo para inscrição destas texturas, devido principalmente a alta qualidade do processo em si e relativo baixo custo de operação. DENKENA, BOEHNKE e KÄSTNER, (2008) apresentam ainda em seu trabalho a representativa melhora no desempenho funcional de peças manufaturadas com superfície texturizada em relação a peças sem uso desta técnica.

Um exemplo de superfícies texturizadas para melhoria do desempenho foi desenvolvido por HASHINOMOTO e OCHIAI, (2008). Os pesquisadores avaliaram experimentalmente algumas texturas desenvolvidas para melhoria da dinâmica de fluidos em mancais aerodinâmicos axiais. Estas foram inscritas na superfície das peças com uso de usinagem a LASER. Como resultado, a melhor proposição de

textura apresentou resultado funcional 20% melhor do que um mancal produzido sem nenhuma textura em sua superfície. A Figura 1.3 apresenta algumas das texturas produzidas pelo pesquisador para composição de seu banco de ensaio.

Figura 1.3 – Superfície texturizada desenvolvida para melhoria do desempenho de mancais axiais aerodinâmicos (HASHIMOTO e OCHIAI, 2008) - Adaptada.

Os resultados de sucesso das técnicas desenvolvidas para texturização de peça através da usinagem com ferramentas de geometria definida demonstraram a capacidade de se construir com precisão uma superfície que atenda os critérios desejados de desempenho. Resultado este que os trabalhos desenvolvidos na área de retificação principalmente buscaram atingir para construção de uma superfície de corte no rebolo que assegure os melhores parâmetros de corte possíveis. Entretanto sem ainda métodos disponíveis para tornar este processo viável.

Frente às vantagens associadas ao uso do processo de usinagem para construção de texturas superficiais e a relativa melhoria do desempenho do processo de corte com uso de ferramenta texturizada, este trabalho apresenta uma metodologia inovadora para atender ambos os resultados. A metodologia proposta consiste, basicamente, em desenvolver um método inovador para inscrição de texturas na superfície do rebolo através do processo de dressagem. Esta é apresentada em detalhes no capítulo 3. O desenvolvimento da metodologia e o sistema para executar este método são apresentados no capítulo 4. Os resultados obtidos e também avaliação detalhada do sistema e método estão contidos no capítulo 5. Os embasamentos teóricos utilizados para composição deste trabalho estão descritos e citados no capítulo 2. Por fim, a conclusão esta apresentada no capítulo 6.

1.1. OBJETIVO

O processo de retificação vem sendo amplamente empregado nos processos produtivos para obtenção de peças com alta qualidade dimensional e superficial. No entanto, o controle preciso da condição de afiação do rebolo para assegurar os níveis de desempenho esperado no processo de retificação não é simples. Os métodos disponíveis utilizam de constantes empíricas para avaliação do desgaste do dressador, monitoramento do processo ou rebolos com superfícies customizadas. Estes apresentam pouca precisão e/ou alto custo, sendo pouco aplicados como consequência.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma metodologia inovadora para inscrição de texturas controladas na superfície do rebolo para atender esta lacuna tecnológica encontrada. O método foi desenvolvido para solucionar dois principais problemas na área de retificação:

- 1 Melhoria do desempenho do processo de retificação através do uso de rebolos texturizados;
- 2 Capacidade de se utilizar a retificação como processo para inscrição de texturas em peças usinadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

O processo consiste em realizar desbaste e acabamento de peças mecânicas através de uma ferramenta abrasiva denominada rebolo, composta basicamente por: grãos abrasivos, agentes ligantes e porosidade (COELHO, 1991) (MALKIN, 1989). O processo de corte é denominado como de “geometria não definida”, devido à diversidade de arestas formadas pelos grãos abrasivos que efetuam o corte.

A remoção de material é promovida através do contato entre a ferramenta abrasiva e a peça, em que cada grão abrasivo do rebolo age como uma pequena ferramenta de corte removendo porções de material (KOPAC e KRAJNIK, 2006). Dada a disposição de milhares de pequenas arestas de corte na superfície do rebolo, a combinação destas com parâmetros adequados de usinagem proporcionam o alto grau de qualidade superficial encontrado em peças retificadas (ALAGUMURTHI, PALANIRADJA e SOUNDARARAJAN, 2007).

A classificação da operação de retificação está relacionada com o tipo de estudo do processo. Para melhor compreensão e desenvolvimento deste trabalho, a classificação adotada foi a norma DIN 8589. Esta norma é orientada pelo processo, denominada de acordo com a operação do rebolo e forma das superfícies geométricas adotadas. Segue Figura 2.1 baseada na denominação da norma (DIN 8589 *apud* OLIVEIRA, 1988).

Figura 2.1 – Operações de retificação segundo norma DIN 8589, ADAPTADA (OLIVEIRA, 1988).

2.1.1. Processo de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho

A retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho consiste em efetuar avanço do reboło perpendicularmente à superfície da peça sendo que ambas, peça e ferramenta, possuem movimento de rotação. Diferentemente do processo de retificação tangencial de passagem, não há deslocamento longitudinal entre a peça e a ferramenta abrasiva (ALAGUMURTHI, PALANIRADJA e SOUNDARARAJAN, 2007) (MALKIN, 1989). A Figura 2.2 ilustra o processo e os principais parâmetros de operação.

Figura 2.2 – Processo de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho.

Os parâmetros principais podem ser observados na Figura 2.2, são estes:

$\vec{v}_s$ – Velocidade periférica do rebolo;

$\vec{v}_f$ – Velocidade de avanço;

$\vec{v}_w$ – Velocidade periférica da peça;

a – Profundidade de corte;

F_n – Força normal de retificação;

F_t – Força tangencial de retificação; e

l_c – Comprimento de contato.

O processo de retificação de mergulho pode ser dividido em seis etapas principais. São elas (OLIVEIRA, 1988):

T1 – Aproximação do rebolo já em velocidade tangencial de corte;

T2 – Contato inicial do rebolo com a peça, etapa em que ocorrem deformações elásticas da peça, rebolo e máquina;

T3 – Remoção de material, formação de cavacos;

T4 – Centelhamento, ou spark-out, período onde o rebolo e a peça continuam girando sem haver deslocamento radial programado. Estágio responsável por aliviar as deformações estruturais do sistema e promover melhores qualidades dimensionais e superficiais à peça;

T5 – Deslocamento da ferramenta para posição de segurança;

T6 – Condicionamento da ferramenta para próxima operação, ou dressagem do rebolo;

A Figura 2.3 demonstra estes estágios em comparação com o modelo ideal de retificação.

Figura 2.3 – Estágios principais do processo de retificação cilíndrica de mergulho, ADAPTADA (OLIVEIRA, 1988).

2.1.2. A ferramenta abrasiva

A ferramenta abrasiva responsável por efetuar o corte no processo de retificação é denominada rebolo. O rebolo é constituído por grãos abrasivos, responsáveis pela remoção do material, e agente ligante, matriz responsável por estruturar a ferramenta. A classificação do rebolo é dada pelo conjunto de suas características, são elas: tipo de grãos abrasivos, tamanho de grão, tipo de ligante, estrutura, dureza e densidade do rebolo (ALAGUMURTHI, PALANIRADJA e SOUNDARARAJAN, 2007) (MALKIN, 1989). O grão abrasivo possui maior dureza que o material a ser usinado, possibilitando assim a remoção do material.

2.2. DESGASTE DA FERRAMENTA ABRASIVA

Um fator importante do processo de retificação consiste no desgaste ocorrido na ferramenta abrasiva. O desgaste possui grande influência na eficiência do processo em si, além de afetar diretamente a qualidade superficial das peças retificadas (ALAGUMURTHI, PALANIRADJA e SOUNDARARAJAN, 2007). O processo de desgaste possui complexidade dada diversidade de interações entre cada grão abrasivo e a superfície da peça retificada. Estudar as causas e efeitos do desgaste do rebolo é essencial para reduzir gastos ferramentais desnecessários e controlar as características especificadas no projeto do componente (CHEN, ROWE, *et al.*, 1998) (OLIVEIRA, 1988).

De acordo com MALKIN (1989), o mecanismo de desgaste pode ser classificado da seguinte forma: desgaste por atrito (A), fratura do grão (B) e fratura do ligante (C). A Figura 2.4 demonstra a localização dos desgastes.

Figura 2.4 – Mecanismos de desgaste do rebolo ADAPTADA (MALKIN, 1989).

A composição dos desgastes ilustrados na Figura 2.4 representa a perda de afiação do rebolo. Segundo GRAHAM e VOUTSADOPOULOS, (1978) este processo pode ser mensurado segundo a curva apresentada na Figura 2.5. Uma relação pode ser estabelecida para avaliação da condição de afiamento do rebolo, representada pela relação G .

Figura 2.5 – Curva de desgaste radial do rebolo em relação ao volume de material removido ADAPTADA (GRAHAM e VOUTSADOPOULOS, 1978).

A análise da figura representa três estágios de desgaste. O primeiro estágio se caracteriza por um desgaste acentuado do rebolo, dado pela fácil remoção dos grãos abrasivos (em pedaços ou inteiros), causado pelo desalojamento e/ou enfraquecimento do grão devido ao processo anterior de condicionamento da ferramenta. Esta fase inicial é considerada quase que instantânea para grande parte dos casos. Depois disso, a taxa de desgaste do rebolo torna-se constante e com os valores mais baixos da curva. O coeficiente angular da reta nesta região é igual ao inverso da relação G , que é a razão entre o volume de material removido pelo volume desgastado do rebolo. Na terceira região observa-se um aumento na taxa de desgaste do rebolo caracterizado por operação insatisfatória e com presença de ruído. Comumente, o condicionamento do rebolo é executado antes desta região ou no momento de mudança da inclinação da curva (ALAGUMURTHI, PALANIRADJA e SOUNDARARAJAN, 2007). Entretanto, os valores representativos desta curva estão associados diretamente a parâmetros de operação, sendo consequência direta das condições de corte utilizadas. Este fato representa a dificuldade técnica de monitorar e controlar as condições para estabelecer assim a melhor condição de trabalho.

2.2.1. Desgaste do rebolo por atrito

O desgaste por atrito proporciona perda da geometria cortante do grão abrasivo. Segundo JACKSON e MILLS, (2004), as principais fontes deste desgaste são:

- Atrito ocasionado pelo contato entre as arestas cortante e a superfície da peça;
- Escoamento plástico do grão abrasivo devido às altas pressões e temperaturas de trabalho;
- Micro fragmentação do grão ocasionado pela difusão térmica e micro-impactos mecânicos; e
- Reação química entre o material da peça e o grão abrasivo em condições de alta temperatura e fluido de corte.

Com o desgaste, observa-se o aumento da área de contato entre os grãos e a superfície da peça pelo arredondamento das arestas de corte, como consequência, o maior atrito entre as partes eleva a temperatura ocasionando maior adesão e reações químicas entre os materiais em contato. Neste estágio deve ocorrer a fratura do grão ou ligante, dado o aumento da área de contato e temperatura. Caso

não ocorra, observa-se um aumento da temperatura de trabalho, podendo ainda danificar termicamente a peça retificada (JACKSON e MILLS, 2004). Inerente ao aumento de temperatura de trabalho, as forças normais de trabalho também aumentam, fator que influi na quebra ou remoção do grão desgastado dando origem a novas arestas cortantes (MALKIN, 1989).

2.2.2. Desgaste do rebolo por fratura do grão abrasivo

O desgaste por quebra do grão abrasivo ocorre quando as forças oriundas do processo, ou ainda termicamente induzidas, são suficientes para promover a fratura do grão abrasivo e remoção destas arestas gastas. Esta remoção dos particulados abrasivos proporciona um benefício para o processo, por disponibilizar novas arestas cortantes (CHEN, ROWE, *et al.*, 1998) (GRAHAM e VOUTSADOPOULOS, 1978).

2.2.3. Desgaste do rebolo por fratura do ligante

Segundo JACKSON e MILLS, (2004), o processo de desgaste por quebra de grãos pode ser confundido com o processo de fratura do ligante, pelos seguintes motivos: ambos são de mesma natureza; estão relacionados com as técnicas envolvidas no processo de condicionamento; ocorrem simultaneamente; e são difíceis de serem quantificados separadamente. No entanto, cada mecanismo de desgaste possui sua influência econômica no processo. O desgaste pela quebra dos grãos possui certa influência positiva no processo, pois introduz novas arestas cortantes, já à fratura do ligante resulta em perda volumétrica mais rápida da ferramenta. JACKSON e MILLS, (2004) ainda afirmam que as combinações dos fatores de retificação influem diretamente nos parâmetros de desgaste, o que dificulta o estudo específico da influência de apenas um fator.

As características funcionais e geométricas da ferramenta utilizada (rebolo) precisam ser restauradas periodicamente, dado o desgaste da mesma. Esta operação é denominada dressagem.

2.3. A OPERAÇÃO DE DRESSAGEM

A operação de dressagem é um processo de condicionamento da ferramenta, ou seja, utilizado para adequar a superfície do rebolo para o corte de material.

Também conhecida como: dressamento, diamantação, afiação ou retificação do rebolo. Tem como principais finalidades:

- 1 Obter concentricidade entre a face do rebolo e o eixo de trabalho;
- 2 Realizar o perfilamento da face de trabalho de acordo com a operação desejada;
- 3 Melhorar a agressividade da face de trabalho através do arrancamento ou quebra de grãos abrasivos gastos, gerando assim novas arestas de corte (OLIVEIRA, 1988).

A operação de dressagem consiste em avançar o dressador sobre o rebolo em movimento, promovendo assim a cada volta a remoção de uma porção de material (MALKIN, 1989). A dinâmica da operação de dressagem pode ser comparada ao processo de torneamento - usinagem com geometria definida. A profundidade de corte é denominada a_d , que associada à largura do dressador em contato com o rebolo b_d determina a porção de material removida por volta. O passo de dressagem por volta S_d pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$S_d = \frac{\pi * d_s * v_d}{v_s}$$

onde: d_s representa o diâmetro do rebolo (mm), v_d a velocidade de deslocamento axial do dressador (mm/min) e v_s a velocidade periférica do rebolo (mm/min).

Outro importante parâmetro do processo de dressagem representa a parcela do dressador em contato com o rebolo a cada volta. Este parâmetro é denominado Grau de recobrimento U_d e é calculado através da relação entre a largura de dressagem b_d e o passo de dressagem S_d :

$$U_d = \frac{b_d}{S_d}$$

A combinação destes parâmetros de dressagem promove o condicionamento do rebolo. A figura apresenta de forma ilustrativa os parâmetros do processo e a dinâmica da operação de dressagem.

Figura 2.6 – Parâmetros e dinâmica da operação de dressagem.

A ferramenta responsável pela operação de dressagem é denominada dressador. Esta ferramenta possui diferentes classificações de acordo com sua atuação, podendo ser estática ou rotativa.

Dressadores do tipo estático são fixos, atuando no sentido axial ao rebolo, classificados de acordo com sua granulação de diamantes naturais, ou seja, ponta única ou conglomerados. Os de ponta única possuem somente um diamante, já os conglomerados são compostos por diversos diamantes, possuindo diferentes tipos de acordo com sua geometria, tais como: igel, prodress, fliese etc (WINTER ABRASIVOS BRASIL, 2003).

Figura 2.7 – Dressadores estáticos (WINTER ABRASIVOS BRASIL, 2003).

Dressadores do tipo rotativo, também conhecidos como rolos ou discos dressadores, são compostos por superfícies recobertas de diamantes naturais e possuem rotação em torno do seu próprio eixo. São muito utilizados para perfilamento do rebolo e dressagem de rebolos superabrasivos, proporcionam alto rendimento e uniformidade no processo (WINTER ABRASIVOS BRASIL, 2003).

Figura 2.8 – Dressadores rotativos (WINTER ABRASIVOS BRASIL, 2003).

2.3.1. Influência da operação de dressagem no desempenho do processo de retificação

A operação de dressagem possui como principal objetivo adequar a superfície do rebolo que será utilizada dentro das condições de corte estabelecidas. Este processo ocorre através da composição de dois principais efeitos, o macro e micro efeito de dressagem.

O macroefeito de dressagem é resultado da geometria do dressador e as condições de dressagem estabelecidas. Consiste na transposição da geometria do dressador à superfície do rebolo devido à profundidade de dressagem a_d empregada e velocidade de deslocamento do dressador ao longo do rebolo (velocidade de dressagem v_d). A combinação destes parâmetros ocasiona inscrição de um perfil de rosca na superfície do rebolo (CHEN, ROWE, *et al.*, 1998) (OLIVEIRA, 1988).

O microefeito de dressagem ocorre devido fratura e/ou arrancamento dos grãos abrasivos ocasionados pelo contato do dressador com a superfície do rebolo (COELHO, 1991).

A combinação destes dois efeitos proporciona a agressividade da ferramenta abrasiva. Ao utilizar parâmetros de dressagem (S_d , a_d) que provam macro e micro efeitos expressivos de dressagem, a agressividade do rebolo será diretamente alta, proporcionando uma condição de desbaste para o processo de retificação, ou seja,

alta remoção de material. Condições que minimizam os efeitos de dressagem proporcionam um rebolo com baixa agressividade, capaz de ser utilizado para operações de acabamento (CHEN e ROWE, 1996) (OLIVEIRA, 1988). A Figura 2.9 ilustra o resultado destas duas condições extremas na superfície do rebolo após a operação de dressagem.

Figura 2.9 – Superfície do rebolo após dressagem com diferente combinação de S_d e a_d ADAPTADA (CHEN e ROWE, 1996).

A dressagem para desbaste é atribuída à operação com padrões como o primeiro exemplo da Figura 2.9, dada disposição de arestas cortantes maiores e espaçadas. O contrário acontece com a dressagem para acabamento, segunda ilustração da Figura 2.9, onde a concentração de arestas cortante é maior. Diversos trabalhos na área de retificação comprovaram que estas características estão diretamente associadas à qualidade superficial das peças retificadas (BIANCHI, 1990) (COELHO, 1991) (CHEN e ROWE, 1996) (OLIVEIRA, 1988). A dressagem para desbaste esta associada à alta rugosidade superficial e baixos valores de potência de retificação, já operações com rebolo condicionado com dressagem de acabamento, apresenta melhor qualidade superficial e alta potência de retificação.

Trabalhos científicos foram conduzidos no intuito de avaliar esta relação direta entre os parâmetros de dressagem e o desempenho do processo de retificação em si (KOPAC e KRAJNIK, 2006) (XUE, NAGHDY e COOK, 2002) (BIANCHI, 1990) (COELHO, 1991) (OLIVEIRA, 1988). Os resultados possibilitaram concluir que condições diversificadas pudessem ser atingidas com o mesmo rebolo. Alterando os parâmetros de dressagem, a mesma ferramenta de corte pode ser utilizada para operações que exijam alta remoção de material, bem como operações para obter alta qualidade superficial nas peças retificadas.

Pesquisas desenvolvidas no laboratório onde este mestrado foi conduzido (LOPF-NUMA / EESC-USP), analisaram a relação direta entre a superfície do rebolo e a qualidade superficial da peça após a operação de retificação. O objetivo dos trabalhos foi avaliar o mecanismo de formação de inscrições indesejadas na superfície de peças retificadas. Este foi desenvolvido para melhoria do processo de retificação de hastes de válvulas de motores a combustão. A Figura 2.10 representa as marcações escolhidas para serem estudas e avaliadas. As inscrições foram observadas durante o processo de retificação, com retífica *centerless*, de haste de válvula de motores, estudo de caso utilizado para esta análise.

Figura 2.10 – Padrão superficial gerado em hastes de válvulas retificadas.

A pesquisa identificou que pequenas oscilações ocorridas durante o processo de dressagem, combinadas com o macroefeito de dressagem, proporcionaram alteração da profundidade de dressagem (a_d) ao longo do processo de dressagem. Esta alteração ocasionou inscrição de texturas na superfície do rebolo que,

comparativamente a uma dressagem sem esta ocorrência, ocasionaram inscrição de também texturas na superfície da peça retificada. Este fato representa perda de qualidade superficial da peça, sendo um fator indesejado para o caso em estudo.

A resolução desenvolvida para esta análise foi observar o meio que estas inscrições ocorriam na superfície do rebolo. O monitoramento do processo de dressagem por emissão acústica foi utilizado para avaliar o contato do dressador com a superfície do rebolo durante os passos de dressagem. A análise comprovou que oscilações ocorridas por perda de rigidez de fixação do dressador ocasionaram perda de continuidade do contato do dressador com a superfície do rebolo, fato que ocasionou as inscrições representadas na Figura 2.10.

O resultado desta pesquisa possibilitou que a metodologia inovadora para texturização de rebolos fosse criada, baseada nas constatações observadas.

2.4. TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL

Os fenômenos físicos mais importantes, relacionados a um produto físico, envolvendo troca de energia ou transmissão de sinal ocorrem na sua superfície. Esta constatação motivou relevantes desenvolvimentos para entender em detalhes como a superfície influencia o desempenho funcional de um produto (BRUZZONE, COSTA, *et al.*, 2008).

Pesquisas têm sido direcionadas (ALAGUMURTHI, PALANIRADJA e SOUNDARARAJAN, 2007) com objetivo de obter superfícies customizadas que representem vantagens para o produto associado. Para tal, diversos resultados obtidos estão diretamente relacionados com os avanços tecnológicos de processo de fabricação mais precisos e confiáveis. BRUZZONE, COSTA, *et al.*, (2008) dividem de maneira simples os processos em dois grandes grupos, são eles: processos com adição de material e com remoção de material.

Entre as tecnologias empregadas para construção de superfícies com remoção de material, a usinagem representa uma opção viável para inscrição controlada de texturas que promovam melhorias em componentes mecânicos (DENKENA, BOEHNKE e KÄSTNER, 2008). Alguns exemplos de tecnologias empregadas são: microusinagem, usinagem a LASER, eletroerosão, usinagem ultrasônica e outras (BRUZZONE, COSTA, *et al.*, 2008).

DENKENA, BOEHNKE e KÄSTNER, (2008) desenvolveram uma técnica capaz de reproduzir inscrições em escala de 10 a 30 μ m de profundidade em peças através do processo de usinagem com geometria definida. Estas inscrições foram desenvolvidas para auxiliar na lubrificação, funcionando como alojamentos para o lubrificante. Desta forma, um eixo fabricado com esta textura pode apresentar desempenho superior ao comum. Com adaptações aos processos comuns de fresamento e torneamento, eles comprovaram ser uma alternativa viável para este tipo particular de aplicação. A alta flexibilidade e qualidade associada ao processo e o relativo baixo custo foram as principais vantagens observadas pelo estudo desenvolvido. A grande aplicação destas tecnologias pode ser observada na área de tribologia (PETTERSSON e JACOBSON, 2006).

A indústria automotiva vem enfrentando severas restrições mundiais quanto à eficiência e poluição de seus produtos, além da alta competência global do mercado. Os desafios atuais de engenharia estão cada vez mais focados no desenvolvimento de novas técnicas e aplicações para promover produtos sustentáveis e de acordo com leis ambientais cada vez mais rigorosas, como exemplo, as novas restrições de emissões de CO₂ para veículos proposto pelo *New European Drive Cycle* – NEDC. Estas pressões vêm desencadeando pesquisas no desenvolvimento de produtos com menores perdas por atrito, calor e redução na emissão de gases poluentes. Um recente trabalho apresentado por pesquisadores da *General Motors USA (General Motors Research and Development Center)* afirma que cerca de US\$ 120 bilhões podem ser economizados por ano, nos Estados Unidos, com o desenvolvimento de novas técnicas de lubrificação das montagens mecânicas envolvidas em peças automotivas (TUNG e MCMILLAN, 2004).

A figura abaixo demonstra um gráfico sobre a distribuição de gastos energéticos em um veículo a combustão leve. A distribuição demonstra a parcela gasta somente em atrito das partes em movimento: eixos, transmissão e partes do motor, cerca de 10% de toda energia disponível.

Figura 2.11 – Distribuição da energia perdida em veículos leves ADAPTADA (TUNG e MCMILLAN, 2004).

Frente estas possibilidades, diversos trabalhos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de desenvolver texturas superficiais que reduzam perdas com atrito ou apresentem melhor desempenho tribológico.

GOLLOCH e MERKER, (2005) avaliaram experimentalmente a melhoria do desempenho de uma superfície texturizada por usinagem a LASER em comparação com uma superfície comum. O objeto de estudo foi o cilindro de um motor a combustão, em que há representativas perdas por atrito causadas pela pouca lubrificação. Os resultados comprovaram que as geometrias inscritas a LASER não somente auxiliaram a redução da força de atrito, o que representa redução no gasto de combustível do veículo operando com este motor, mas também contribuíram expressivamente para aumento da vida do componente, devido à melhoria da dinâmica do lubrificante na superfície com textura.

Resultado análogo foi observado por (HASHIMOTO e OCHIAI, 2008). Os pesquisadores avaliaram a capacidade de inscrições de texturas influírem no desempenho de mancais aerodinâmicos, em especial aumentar a rigidez da montagem. Para tal, os pesquisadores desenvolveram um modelo matemático para avaliação computacional de alguns padrões de inscrições. As inscrições foram então computacionalmente aprimoradas para proceder uma avaliação experimental destas. O resultado também comprovou que as texturas aumentaram a capacidade de carga do mancal, em alguns casos, e em outros aumentaram a rigidez da montagem.

O estudo apresentado por (ETSION, 2005) apresenta uma importante revisão de trabalhos já desenvolvidos para construção de texturas superficiais para melhoria do desempenho tribológico. Em especial, o pesquisador apresenta os excelentes resultados obtidos com o uso de LASER para inscrição destas texturas na superfície das peças estudadas.

Este levantamento bibliográfico demonstra a grande aplicação que vem sendo desenvolvida pelos pesquisadores na área de tribologia. Entretanto, as técnicas utilizadas para construção destes resultados ainda está associada a processos de fabricação relativamente caros e lentos, representando, contudo, uma barreira prática para utilização destes métodos.

A metodologia inovadora para texturização de rebolos representa uma alternativa para este processo. Uma vez que a maioria destes elementos são fabricados com uso de processos de usinagem, em especial a retificação para atender aos requisitos de qualidade dimensional e superficial, a utilização deste processo como meio para produzir estas inscrições torna desnecessária a adoção de um novo equipamento de produção. Além de ser financeiramente mais vantajoso o uso da retificação, a mesma já atende aos critérios de qualidade do produto em si, visto que este já é empregado.

2.4.1. Rebolos com superfícies customizadas

Associado aos trabalhos descritos no item anterior, outra aplicação para superfícies customizadas também foi encontrada na área de retificação. Neste caso, diferentemente de fins tribológicos, a texturização possui a finalidade de tornar o processo de corte otimizado e apto a atender objetivos específicos de aplicação. Para isto, uma ferramenta customizada é utilizada com topografia para melhor desempenho de corte.

A pesquisa desenvolvida por (KIM, KANG, *et al.*, 1997) utilizou destes conceitos para aplicar um rebolo com superfície customizada na usinagem de matérias de difícil usinabilidade. Os pesquisadores desenvolveram uma ferramenta de corte com canais, criando assim uma condição de corte descontínuo. A Figura 2.12 representa uma das ferramentas desenvolvida. Em comparação a uma usinagem com rebolo sem estas inscrições, a ferramenta com os canais possibilitou a redução da temperatura de usinagem, da força de retificação e representativo aumento na vida da ferramenta e qualidade da peça usinada.

Entretanto, mesmo sendo comparativamente melhor, a ferramenta necessita ser previamente fabricada de acordo com esta especificação. Esta constatação apresentada pelos pesquisadores representa uma das barreiras práticas para este tipo de metodologia. Para cada aplicação, uma ferramenta específica deve ser produzida para atender aos critérios estabelecidos. Além de ser necessário um dispositivo específico para manter estas condições devido desgaste sofrido pela ferramenta ao longo do corte.

Figura 2.12 – Rebolo desenvolvido por (KIM, KANG, *et al.*, 1997) para retificação de materiais DTG, ADAPTADA.

Outros trabalhos também foram encontrados sobre a mesma metodologia, como (HEINZEL e RICKENS, 2009) (LEE, WONG e ZHANG, 2000) e (NAKAYAMA, TAKAJI e ABE, 1977). As pesquisas comprovaram a funcionalidade do uso de rebolos com superfícies customizadas para melhoria do desempenho do processo de retificação. Entretanto, a produção destas ferramentas dedicadas e específicas e a alta complexidade na dressagem destes rebolos, representam uma barreira para adoção desta metodologia para produção de componentes.

A metodologia proposta para texturização de rebolos através do processo de dressagem representa uma possível alternativa para esta linha de pesquisa. O método possibilita a inscrição de texturas durante o processo de condicionamento do reboleiro, utilizando assim a própria estrutura da retificadora para inscrição dos padrões geométricos desejados. Faz-se necessário a inclusão de um eixo controlado para prover a alteração da profundidade de dressagem, porém o processo é executado na retificadora. Em complemento, trata apenas de uma

adaptação do mesmo equipamento de produção, capaz de manter as características do processo em si.

2.5. MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO POR MAPEAMENTO COM EMISSÃO ACÚSTICA

OLIVEIRA e DORNFELD, (2001) propuseram um sistema inovador para processamento e análise do sinal acústico do processo de retificação. Este método é baseado na análise do sinal RMS da emissão acústica (EA) em intervalos temporais bastante curtos. O valor RMS (*root mean square*), ou valor médio quadrático, é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável, neste caso, a quantidade variável medida é o sinal de EA oriundo do contato entre os grãos abrasivos do rebolo e a peça, no caso de monitoramento do processo de retificação, ou do contato entre os grãos abrasivos e o dressador no caso do monitoramento do processo de dressagem. A Figura 2.13 exibe o sistema desenvolvido pelos pesquisadores.

Figura 2.13 – Montagem desenvolvida por (OLIVEIRA e DORNFELD, 2001), ADAPTADA.

Como se pode observar pela Figura 2.13, o sistema capta as intensidades do sinal de emissão acústica e converte este em valores RMS na unidade de condicionamento de sinal. O sistema também capta o sinal de posição angular enviado pelo sensor indutivo instalado na máquina, que envia pulsos indicando quando o reboło executou uma volta. Desta forma o sistema é capaz de sincronizar a leitura obtida da emissão com a posição relativa do dressador na face do reboło.

O sistema envia as informações obtidas dos sensores para um software desenvolvido em LabView® (Sistema portátil para mapeamento EA) que interpreta os resultados e gera um gráfico compondo: deslocamento do dressador e emissão acústica. O gráfico é construído devido à representação do nível de EA dos dados lidos com intensidade de cores. Assim, durante a operação de dressagem, pode-se compor uma visualização em tempo real através da adição de colunas no gráfico para cada volta do reboło (o que também corresponde a um passo do dressador). A Figura 2.14 ilustra a construção do mapa acústico.

Figura 2.14 – Procedimento para construção do mapa acústico, *ADAPTADA* (OLIVEIRA e DORNFELD, 2001).

As principais aplicações do mapeamento por emissão acústica são: avaliação da dressagem, avaliação da retificação e mapeamento da topografia do reboło. Alguns destes resultados estão ilustrados na Figura 2.15. A referência 1 - Figura 2.15 representa o mapeamento acústico para detecção de falhas na superfície do

rebolo durante a dressagem. A referência 2 - Figura 2.15 representa avaliação de descentragem do rebolo, avaliada também durante a operação de dressagem. A referência 3 - Figura 2.15 representa detecção de vibrações ocorridas durante o processo de retificação da peça.

Figura 2.15 – Resultados de monitoramento por mapeamento de emissão acústica, ADAPTADA (OLIVEIRA e DORNFELD, 2001).

3 PROPOSTA DO SISTEMA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS

A metodologia adotada consiste em introduzir uma excitação mecânica externa controlada no corpo do dressador para alteração dinâmica da profundidade (a_d) ao longo do processo de dressagem do rebolo. Esta metodologia foi desenvolvida baseada em resultados prévios de trabalhos na área de otimização do processo de retificação para avaliação das condições de dressagem e suas influências na qualidade superficial final das peças usinadas. Estes trabalhos sustentaram a hipótese de se utilizar o processo de dressagem como ferramenta para perfilamento da superfície do rebolo dentro de padrões estabelecidos. As inscrições são posteriormente transmitidas à superfície da peça durante a operação de retificação.

Figura 3.1 – Metodologia proposta para texturização de peças através do processo de retificação.

A metodologia proposta é graficamente ilustrada pela Figura 3.1. Pode-se dividir o processo de texturização em três etapas principais: criação das texturas, inscrição das texturas na superfície do rebolo e transferência das texturas a superfície da peça.

Na etapa 1 o padrão de textura escolhido para ser inscrito deve ser criado. A metodologia adotada para este processo consiste em projetar ao longo da circunferência do reboło o padrão de textura a ser inscrito. Os valores de diâmetro do reboło (D) e largura (T) (Figura 3.2) são utilizados para o cálculo das texturas. Este padrão é então segregado segundo a velocidade de rotação do reboło (v_s), grau de recobrimento (U_d) e largura de dressagem (b_d), para que possa ser atribuída a cada rotação do reboło a parcela de textura baseada na velocidade de deslocamento do dressador ao longo de sua superfície. Nesta etapa, cada passo de dressagem representa uma parcela da textura que será inscrita ao longo da circunferência do reboło. Por este motivo, os parâmetros de dressagem são utilizados. A textura é então convertida em sinais elétricos para possibilitar movimentação linear do dressador de acordo com a inscrição desejada. Este processo é executado com auxílio de um *software* desenvolvido para o cálculo da trajetória do dressador ao longo da circunferência do reboło e criação dos sinais elétricos. O *software* utiliza ondas senoidais para converter a textura desejada em sinais analógicos que serão transmitidos sincronizadamente com a posição angular do reboło ao amplificador operacional do excitador. A Figura 3.2 ilustra esta primeira etapa da metodologia.

Figura 3.2 – Metodologia para texturização de rebolos – etapa 1.

A etapa 2 consiste em utilizar os sinais gerados pelo *software* para a alteração dinâmica da profundidade de dressagem durante processo de condicionamento do rebolo com as condições estabelecidas inicialmente. A cada revolução do rebolo o sinal referente a esta posição é enviado ao excitador eletromecânico. O excitador converte o sinal analógico em movimentação mecânica para a alteração da profundidade de dressagem de acordo com o padrão escolhido. Desta forma as texturas determinadas são inscritas na superfície do rebolo. A Figura 3.3 ilustra esta etapa.

Figura 3.3 – Metodologia para texturização de rebolos – etapa 2.

Por fim, com a superfície do reboleiro inscrita com as texturas escolhidas e condicionada com os parâmetros de dressagem, é executada a operação de retificação para remoção do sobremetal da peça e transcrição das texturas. Devido à velocidade relativa entre as superfícies do reboleiro e a peça para a remoção do material, as texturas inscritas são distorcidas. A velocidade de rotação da peça (v_w) é inferior a velocidade do reboleiro (v_s), resultando em um número de revoluções do reboleiro sobre a superfície da peça. Devido a este fato, as velocidades de revolução devem ser estabelecidas segundo uma relação de rotação que assegure um número inteiro de voltas do reboleiro sobre a superfície da peça. Desta forma, a cada revolução da peça a superfície texturizada do reboleiro estará precisamente alinhada com a anterior. Este método, aqui adotado, será chamado de processo de texturização sincronizado e será estabelecido através da relação entre as velocidades periféricas da peça e do reboleiro, determinada Relação R. A fórmula da Relação R é:

$$R = \frac{v_s}{v_w}$$

O valor da Relação R pode então ser utilizado para estabelecer as dimensões das texturas na superfície do reboleiro para se obter os padrões desejados na peça após a retificação. A formulação abaixo relaciona o comprimento das texturas na superfície da peça (L_w) com o comprimento destas na superfície do reboleiro (L_s):

$$L_w = \frac{L_s}{R}$$

A Figura 3.4 representa esta formulação e também a execução da etapa 3 para texturização da peça durante o processo de retificação. As referências 1 e 2 -

Figura 3.4, ilustram as texturas inscritas na superfície da peça referente a uma revolução completa do reboło sobre a peça.

Figura 3.4 – Metodologia para texturização de rebolos – etapa 3.

A metodologia sincronizada para texturização será experimentalmente avaliada em comparação com uma condição de não sincronização. Desta forma será comprovada a necessidade de se utilizar mecanismos precisos para assegurar a devida sincronização das velocidades de rotação.

Nas seções seguintes são representadas as avaliações experimentais para comprovação desta metodologia para texturização de peças através do processo de retificação. O sistema proposto para execução desta metodologia será apresentado e os resultados obtidos avaliados.

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS

A metodologia básica para composição deste método consiste em prover movimentação controlada do dressador ao longo do processo de dressagem para inscrição de texturas na superfície da ferramenta abrasiva. O sistema proposto para atender a metodologia consiste em uma ferramenta computacional capaz de interpretar padrões de textura (*software* de geração e controle) e converter estes em estímulos controlados do excitador eletromecânico instalado junto ao dressador de uma retificadora cilíndrica CNC. O desenvolvimento deste sistema e os materiais utilizados são apresentados nos parágrafos seguintes deste capítulo. Todo o processo experimental foi realizado no Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação - LOPF, no Núcleo de Manufatura Avançada – NUMA, da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

O *software* responsável por transformar padrões de textura superficial em sinais elétricos enviados ao excitador eletro-mecânico foi desenvolvido na plataforma de programação *LabVIEW – National Instruments*. Foi escolhida esta plataforma por proporcionar um ambiente simples para composição de ferramentas para aquisição, manipulação e geração de sinais analógicos e digitais, além de ser integrada com os dispositivos escolhidos para a montagem do sistema. A plataforma proporciona uma linguagem de programação gráfica que utiliza ícones e fluxo de dados para sua execução, ao invés de linhas de comando e instruções. Isto proporciona o desenvolvimento de estruturas de interface interativa com o usuário, os painéis frontais, com controles e indicadores. Estes são interligados com a lógica e códigos de programação, que estão contidos no diagrama de blocos, representações gráficas de funções que controlam o painel frontal. A integração destes dois ambientes determina os instrumentos virtuais, ou *virtual instruments* (VI), como são chamados, interface interativa relativamente simples de controle e operação. A funcionalidade e montagem básica do sistema proposto esta graficamente representada pela Figura 4.1.

Figura 4.1 - Sistema adotado para controle posicional do dressador ao longo do processo de dressagem.

O *software* é a plataforma responsável pela composição do sinal analógico de atuação – referência 3 da Figura 4.1. Para composição deste sinal, o *software* monitora o sinal analógico do posicionamento angular do rebolo, para sincronizar as ondas geradas com a atual posição da ferramenta abrasiva – referência 2 da Figura 4.1. O sinal de atuação é enviado ao amplificador operacional do atuador (*Labworks PA-138*), que condiciona e amplifica o sinal e encaminha ao atuador – referência 4 da Figura 4.1. O sistema de aquisição de dados é composto pela placa portátil de comunicação *PCMCIA*, conector *BNC* e biblioteca de comunicação *NI Traditional DAQ* – todos dispositivos *National Instruments* integrados ao *software* desenvolvido – referência 1 da Figura 4.1. Para monitoramento do sinal enviado ao atuador, um osciloscópio analógico foi adicionado à montagem.

A primeira versão do sistema para controle dinâmico da profundidade de dressagem foi desenvolvida com o objetivo de inicialmente estudar os parâmetros de operação. Para estes primeiros testes foi escolhido apenas de um tipo de excitação mecânica, uma onda senoidal parametrizada pelo usuário. Foi adotada esta onda por ser um padrão simples de ser executado, observado, controlado e compatível com as características do atuador disponível.

O *software* recebe os padrões de onda senoidal escolhidos para criação das texturas na superfície do rebolo e, junto com os dados referentes à posição angular

do rebolo, envia as informações de excitação para o amplificador operacional do excitador. A programação desenvolvida na plataforma procurou atender a critérios básicos de estruturas de programação: disponibilizar as interfaces de maneira simples, didática e passível de futuras aprimorações. Desta forma definiu-se a plataforma básica para outras versões de acordo com as melhorias desejadas.

A Figura 4.2 ilustra a interface com o usuário desenvolvida. Nesta interface os dados de entrada, dispostos ao lado esquerdo da interface, são informados para composição do sinal analógico senoidal de atuação que será enviado ao amplificador operacional do *Shaker* (referências 1, 2 e 3 - Figura 4.2). O usuário define nas entradas de dados os parâmetros da onda senoidal que deseja executar (referência 3 - Figura 4.2). O programa calcula, gera e armazena a onda senoidal nas condições de amostragem definida (referência 1 - Figura 4.2). Os parâmetros de temporização (referência 3 - Figura 4.2) são então utilizados para sincronização do sinal de gatilho (*Trigger*) que monitora a posição angular do rebolo. No momento de sincronização da posição de início da texturização com a atual posição do rebolo o sistema envia o sinal da onda e então aguarda outro sinal do sensor de proximidade indutivo, instalado próximo ao rebolo, para composição do novo sinal. Desta forma o processo de texturização se mantém devidamente sincronizado durante o processo de dressagem. A cada revolução novos sinais são gerados interativamente para composição da textura ao longo do deslocamento tangencial do dressador na face do rebolo.

Figura 4.2 – Interface visual (Front Panel) desenvolvida para texturização – versão básica.

A interface representada na Figura 4.2 promove a interação do usuário com o *software*, através dos controles (localizados a esquerda) e dos indicadores (localizado a direita). Esta é uma estrutura típica de arquitetura de *software*, onde controladores e indicadores devem ser dispostos de maneira simples e compreensível. Em caso de uma parada, o botão “STOP” (referência 5 - Figura 4.2) deve ser acionado para interromper a execução do programa, por isto está disposto de maneira a facilitar o acionamento pelo usuário. O gráfico ao centro direito da tela (referência 4 - Figura 4.2) representa a forma de onda enviada para o amplificador do atuador, possibilitando monitoramento em tempo real da onda senoidal gerada.

Toda estrutura de envio e recepção dos dados e controle do painel frontal está contida no bloco de diagramas. Para facilitar a visualização, estruturas repetitivas são armazenadas em subprogramas, denominados sub-Vis. Estes são representados por ícones customizáveis, obtendo os parâmetros necessários para execução da rotina a esquerda do ícone e a saída dos dados localizada a direita do

ícone. Para a aplicação, alguns subprogramas desenvolvidos pela empresa fabricante da plataforma foram utilizados, no intuito de facilitar a aquisição e envio de dados. O próprio programa foi customizado para poder ser utilizado como *sub-VI* dentro de outro programa.

A funcionalidade do *software* se estabelece da seguinte forma. Primeiramente os dados informados pelo usuário referente à onda senoidal para texturização são enviados para a sub-rotina “Sine Waveform.VI”. Esta sub-rotina gera a onda baseada na velocidade de rotação do rebolo (*Grinding Wheel Speed*) e o número de pontos escolhidos (*# of points*). Desta forma, a onda gerada é precisamente alinhada com o comprimento do rebolo e dentro do padrão de textura escolhido. O sinal é então armazenado em um *buffer* de memória para aguardar sincronismo com a posição do rebolo.

Os parâmetros referentes aos sinais analógicos de *Trigger* e emissão do sinal de atuação são encaminhados aos sub-programas padronizados para atuar na instrumentação. O ciclo básico consiste em configurar e preparar o dispositivo de entrada e saída de dados, aquisição ou emissão, manipulação e finalização. A Figura 4.2 – referências 1 e 2 representam os controladores de entrada de dados para configuração da emissão analógica e sinal de *Trigger* respectivamente. A placa de comunicação que será utilizada é selecionada no controlador “*Device*”, representada por um número inteiro e, neste caso, a mesma para ambos sinais. São então selecionados os canais que serão utilizados para cada processo. A placa de comunicação *National Instruments* escolhida (*NI 6040-E*) possui dois canais de entrada analógicos dedicados para aquisição de *Trigger*, sendo utilizado um destes para a montagem. A placa ainda dispõe de oito canais analógicos para aquisição de dados com capacidade de até 250kS/s simultâneos, além de dois canais para emissão de sinais analógicos. O sistema proposto utiliza apenas um dos canais de saída analógica para geração da onda senoidal que será enviada ao amplificador operacional do atuador.

Um parâmetro adotado define um pequeno tempo que o sistema necessita para executar a leitura do sensor de proximidade indutivo (*Trigger*) e enviar o sinal para o amplificador do atuador. Para que sejam inscritas de maneira controlada e sincronizada, as texturas estão restritas a apenas uma região da circunferência do rebolo, mantendo assim uma região de segurança para assegurar sincronização independente de alterações que venham a ocorrer durante o processo de

dressagem. Esta região é condicionada através da constante de atraso na geração do sinal de atuação (*Mult. Constant*). Representa a porcentagem perdida de maneira a combinar os sinais de envio e posição do rebolo. No equipamento utilizado no laboratório, este parâmetro foi definido com 1.20, ou seja, a onda está 20% adiantada em relação ao sinal de rotação do rebolo.

As informações de velocidade de rotação do rebolo (*Grinding Wheel Speed*), constante de atraso (*Mult. Constant*), a amplitude da onda seno (*Amplitude*) e o número de ciclos que serão inscritos a cada revolução (*# of cycles*) são utilizados para composição do sinal senoidal e também temporização do canal analógico utilizado para emissão do sinal. A temporização do sinal de *Trigger* também é condicionada pela velocidade de rotação do rebolo e constante de atraso, porém outros parâmetros são definidos para devida funcionalidade do dispositivo. A metodologia para sensibilidade do sinal é definida baseada no tipo de condição de *trigger*, valor do sinal de referência e histerese – Figura 4.2, referência 2.

Somente uma estrutura repetitiva foi utilizada, em qual a cada sinal de *Trigger* é executada uma emissão de onda senoidal para o amplificador do atuador. Quando selecionado o botão “*STOP*” o ciclo termina, finalizando a parte operacional do programa. Por fim, as portas de emissão e recepção são finalizadas e os erros de execução, caso ocorram, são reportados para o usuário.

Para a atuação foi utilizado o “*Shaker ET-139*”, equipamento da *Labworks Inc.* O excitador eletrodinâmico, ou *shaker*, é convencionalmente utilizado em ensaios de vibração. O equipamento recebe ondas de vibração (senoides, ruídos etc.) e proporciona vibrações mecânicas controladas em sua haste de saída. Para a aplicação proposta, foi desenvolvido um software que envia pulsos variáveis, determinado por padrões escolhidos pelo usuário.

Figura 4.3 – Shaker desenvolvido pela empresa Labworks Inc. e utilizado no sistema proposto.

O excitador eletro-mecânico transforma ondas elétricas em excitação monoaxial em sua haste de saída. Este deve ser instalado de maneira a proporcionar estabilidade dinâmica e evitar a influência de interferências externas. Com este objetivo, foi fixado junto à estrutura da retificadora por meio de correias, de maneira a evitar transmissão de vibrações em outras direções além da haste. Este método baseou-se em estudos de vibração realizados pelo pesquisador doutor Thiago Valle França, também integrante da equipe do laboratório LOPF-NUMA, e está de acordo com especificações do fabricante do instrumento. A Figura 4.5 ilustra esta montagem junto a retificadora CNC utilizada para os ensaios e validação da metodologia proposta.

A transmissão de movimento do atuador para o dressador foi feita através da ligação rígida da haste de atuação ao dressador, instalado no contra-ponto da retificadora CNC. A fixação foi assim adotada devido este ser o ponto disponível mais próximo do alojamento do dressador da máquina. Esta montagem apresenta um desafio operacional devido à alta rigidez deste sistema. O contra-ponto da máquina está fixado junto a guia prismática da máquina, montagem rígida para manter estabilidade durante o processo de dressagem e também retificação executados pelo equipamento. Entretanto, ao adotar esta fixação a montagem não afeta representativamente a estabilidade dinâmica da retificadora, mantendo assim o alto padrão de qualidade assegurado pelo equipamento em si.

A Figura 4.4 ilustra a junção da haste de excitação do *Shaker* (referência 2 da Figura 4.4) ao cabeçote contra-ponto da retificadora (referência 3 da Figura 4.4), onde está instalada a base do dressador de ponta única (referência 4 da Figura 4.4). Através desta fixação foi possível induzir as oscilações controladas para a precisa

movimentação linear do dressador. Toda esta montagem foi testada buscando as limitações atuais para a construção final de um dispositivo robusto e otimizado para inscrição das texturas em ambientes fabris.

Figura 4.4 – Montagem do sistema de atuação na retificadora CNC.

A retificadora CNC utilizada foi a *ZEMA Numerika G-800-HS*. Esta máquina recebeu algumas alterações para que pesquisas fossem executadas no laboratório, segue abaixo as atuais características da retificadora:

- Comando CNC de arquitetura aberta– *GE Fanuc 18iT*;
- Máxima velocidade de corte: 100 m/s;
- Máxima potência disponível do motor: 15 cv;
- Mancal hidrostático no eixo porta-rebolo;
- Sistema de monitoramento e mapeamento por emissão acústica – *Sensis*;
- Comprimento máximo retificável: 800 mm;
- Dimensões máxima do rebolo: 508mm x 80mm x 203,2mm.

Figura 4.5 – Sistema adotado para fixação do Shaker junto a retificadora CNC.

Para inscrição no rebolo foi utilizado um dressador de ponta única. Este tipo de dressador foi escolhido por proporcionar uma pequena área de contato com o rebolo, o que representa maior precisão nas inscrições. O dressador foi medido com auxílio do microscópio de medição digital *Zeiss Stemi 2000C*, equipado com câmera digital *Zeiss Axio Cam ICc3* e software para interpretação das imagens *Zeiss Axio Vision Rel. 4.6*. Através desta montagem, foi possível determinar a largura de dressagem (b_d) de acordo com cada profundidade de dressagem (a_d) utilizada nos ensaios. Este processo foi adotado para assegurar precisão de posicionamento do dressador e também alta qualidade nas texturas a serem desenvolvidas. A Figura 4.6 representa o dressador utilizado, em detalhe o sistema de fixação do dressador já disposto na retificadora, instalado no contra-ponto da máquina.

Figura 4.6 – Fixação do dressador na retificadora CNC utilizada – alojado no conta-ponto da máquina.

A ferramenta de corte utilizada foi um rebolo de óxido de alumínio da empresa *Norton Saint-Gobain*, de dimensões nominais: 500mm (diâmetro externo) x 50mm (largura de corte máxima) x 203,2mm (diâmetro do furo). O modelo utilizado foi *SGB60-LVHB*. Este rebolo é composto por uma mistura de três abrasivos: óxido de alumínio branco, óxido de alumínio monocristal e óxido de alumínio cerâmico, granulometria de 60 mesh, dureza L (média) e liga vitrificada modificada. A face de corte do rebolo pode ser observada na Figura 4.6.

O sistema de monitoramento por emissão acústica *Sensis*, associado com a aplicação desenvolvida em *LabVIEW* por pesquisadores do LOPF-NUMA para construção do mapa acústico de operação, foi utilizada para visualização com precisão do contato entre os grãos abrasivos do rebolo com a ponta do dressador (durante operação de dressagem) e superfície da peça (durante operação de retificação). A Figura 4.7 representa o monitoramento por emissão acústica do processo comum de dressagem. O mapeamento torna-se visual com tonalidades de amarelo, representando regiões onde houve emissão acústica e preto onde não houve contato entre os grãos abrasivos do rebolo e a peça.

Figura 4.7 – Representação de uma mapa acústico comum de dressagem.

A Figura 4.8 representa a montagem utilizada, composta pelo sensor sem contato (referência 1) instalado junto ao cabeçote porta-rebolo para monitoramento da interação dos grãos abrasivos, sensor indutivo digital (referência - 2) utilizado para referenciamento da posição angular, módulo de monitoramento MSM (referência - 3) responsável por condicionar o sinal do sensor e enviar os dados para o software instalado junto a plataforma PC-HMI de operação da retificadora, e software (referência - 4) para construção do mapa acústico de operação.

Figura 4.8 – Sistema de monitoramento por emissão acústica instalado na retificadora CNC.

O sistema para texturização foi avaliado em dois ensaios funcionais. Nestes dois testes o objetivo foi verificar a montagem proposta, capacidade do sistema para construção de texturas na superfície do rebolo, transmissão destas a superfície da peça e levantamento dos primeiros parâmetros de operação.

Para o primeiro ensaio, corpo de prova CP-1, foram inscritos três ciclos de onda senoidal por volta do rebolo e atribuída uma relação R igual a 10, ou seja, deseja-se observar 30 (3 senos x 10 giros) ciclos de seno por volta da peça após operação de retificação. A amplitude de atuação adotada foi determinada pelo ganho operacional do excitador harmônico, média (2), sendo texturizada toda a superfície do rebolo. O material escolhido para os testes foi Inconel, material de difícil usinabilidade, porém muito utilizado em peças retificadas em motores a combustão. Os parâmetros usados são descritos abaixo:

- Corpo de prova: CP-1
- Material do corpo de prova: Inconel
- Velocidade de corte (vs): 30m/s
- Largura de dressagem (bd): 0,115 mm
- Profundidade de dressagem (ad): 20 μ m
- Velocidade de dressagem (vd): 146,34 mm/s

- Relação R: 10
- Material removido: 30 μm (no diâmetro)
- Amplitude da onda seno: 4,0 volts
- Ganho operacional Shaker: 2
- Textura escolhida: três ondas senoidais

Após operação de retificação foi executado análise do perfil do rebolo através de operação de dressagem com monitoramento por emissão acústica. Esta análise, quando comparada a operações de dressagem comuns, deve representar as inscrições ao longo da circunferência da ferramenta, bem como a profundidade destas inscrições.

Figura 4.9 – Mapa acústico de dressagem CP-1.

Na Figura 4.9, é possível observar os 3 ciclos de onda senoidal na superfície do rebolo, indicando que a geometria da ferramenta foi controladamente alterada. Em seguida foi executada análise dos resultados na superfície da peça retificada através de medição da circularidade no equipamento *Talyrond 131*. A estratégia

inicial para transcrição das texturas buscou promover somente uma rotação da peça, proporcionando assim com exatidão a transcrição da superfície do rebolo à peça. A Figura 4.10 mostra o relatório de medição.

Figura 4.10 – Análise de circularidade após texturização CP-1.

Através da medição podem-se observar os ciclos de onda seno dispostos ao longo da superfície da peça, aproximadamente 30 ciclos (número esperado devido à relação R). A região no gráfico em destaque, 90°, consiste na região onde ocorreu a remoção de material sem giro da peça, área de contato antes do giro controlado do eixo C da retífica. Para melhor visualização das texturas, foi aplicado filtro de Gauss com faixa de medição entre 25 e 35 upr (unidades por revolução), adequado para medição do número de ciclos esperado. Com amplitude de atuação média, observa-se uma pequena profundidade das inscrições na peça, o que impossibilitou a análise visual das texturas. A escala ajustada do gráfico apresentou medição de, aproximadamente, 2,5µm de profundidade das texturas.

O segundo ensaio, corpo de prova CP-2, foi conduzido com o objetivo de tornar mais visíveis as marcações, sendo assim foram inscritos os mesmos três ciclos de onda senoidal por volta do rebolo, porém a relação R foi determinada 15. A amplitude de atuação foi alterada para a mais alta e foi texturizada somente uma faixa do rebolo (central em relação à largura total do rebolo). Os parâmetros usados são descritos abaixo:

- Corpo de prova: CP-2

- Material do corpo de prova: Inconel
- Velocidade de corte (v_s): 30m/s
- Largura de dressagem (b_d): 0,115 mm
- Profundidade de dressagem (a_d): 20 μ m
- Velocidade de dressagem (v_d): 150,08 mm/s
- Relação R: 15
- Material removido: 30 μ m (no diâmetro)
- Amplitude da onda seno: 4,0 volts
- Ganho operacional Shaker: 3
- Textura escolhida: três ondas senoidais somente em uma faixa central da largura do rebolo

Seguindo a metodologia utilizada no corpo de prova CP-1, executou-se mapeamento acústico da superfície da ferramenta abrasiva. Segue figura com o resultado.

Figura 4.11 – Mapa acústico de dressagem CP-2.

Como pode ser observado pela Figura 4.11, somente uma faixa intermediária com os três ciclos de ondas senóides foi texturizada. Por fim, foi executada análise da superfície texturizada da peça também com aplicação de filtro de Gauss, porém com faixa de medição de 35-45 upr.

Figura 4.12 - Análise de circularidade após texturização CP-2.

Mais uma vez observou-se a região em destaque, onde ocorreu facetamento da peça, 240°-250°, um fator crítico no desenvolvimento do projeto. Em comparação com o primeiro ensaio, as ondas senoidais estão mais visíveis, profundas e homogêneas. A profundidade medida foi aproximadamente de 4µm, na região onde foram inscritas as texturas. Observou-se também que o número de ciclos aproximou do número esperado, 45 ciclos por volta da peça (3 senos x 15 giros).

Os resultados destes dois testes iniciais para validação do sistema proposto comprovaram a funcionalidade do método e também do sistema. Estes resultados foram tomados como base para composição do banco de ensaios, explanado em detalhes no próximo capítulo, para tornar o método de texturização apto a atender os objetivos deste trabalho.

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA

Neste capítulo serão discutidos os testes experimentais realizados para comprovação e avaliação experimental da metodologia inovadora proposta. Serão também avaliados levantamentos teóricos apontados durante o desenvolvimento do método. São eles: avaliação do método de sincronização entre o rebole e peça para devida texturização superficial; avaliação dos parâmetros operacionais para utilização do método proposto; e influência da texturização no desempenho do processo de retificação. Estas proposições contemplam a capacidade do método desenvolvido em atender aos objetivos deste trabalho.

5.1. AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO ENTRE O REBOLO E A PEÇA

A primeira avaliação experimental proposta consiste em analisar em detalhes a metodologia para sincronização da rotação entre o rebole e a peça durante a operação de retificação para transcrição das texturas.

A metodologia para texturização através do processo de retificação está baseada na proposição inicial de que a transcrição somente será possível se houver a devida sincronização durante todo o processo de corte. Neste estágio o rebole deve remover o sobremetal e também inscrever as texturas na superfície da peça a cada revolução. Porém são necessárias diversas voltas para se atingir as dimensões desejadas, fato este que proporciona sobreposição das texturas a cada nova rotação. Sendo assim, faz-se necessário adotar devida sincronização a cada volta relativa entre peça e rebole, garantindo que as texturas estejam devidamente posicionadas durante todo o processo de corte.

Inicialmente foi assegurada a ausência de sobreposição de texturas removendo todo o sobremetal durante apenas uma revolução da peça. A precisão de posicionamento foi assegurada pelo sistema de controle da retificadora, que iniciou a rotação da peça apenas quando a profundidade de corte total foi atingida. Nesse início, ao proporcionar contato da peça com o rebole, sem rotação relativa entre as superfícies, foi observado facetamento nessa região da peça. Isto representa não somente perda de qualidade superficial, mas também limitação de uso do método para remoção de baixo volume de material.

Para solucionar este problema foram realizados novos ensaios que avaliaram a sincronização do sistema, utilizando uma relação inteira de velocidade de rotação entre o rebole e a peça (Relação R). Ao adotar uma Relação R constante e inteira, ao longo de todo o processo, assegura-se que ao final de cada rotação completa da peça o rebole estará novamente posicionado na mesma posição da volta anterior, garantindo, desta forma, a devida sobreposição durante todo o processo de corte e qualidade superficial desejada.

Neste primeiro ensaio foi então estabelecida uma relação de rotação R igual a 10, ou seja, a velocidade de rotação da peça foi 10 vezes menor que a do rebole durante todo o corte. Neste ensaio, foi levantada a primeira possibilidade de utilizar ondas senoidais para construção das texturas. A textura escolhida foi tipo linear, ou seja, a função seno teve sua fase incrementalmente alterada a cada revolução do rebole. Esta textura teve como objetivo avaliar a capacidade de se utilizar as ondas senoidais como ferramenta para construção de texturas variadas. Todas foram desenvolvidas para aplicação e avaliação da metodologia para texturização de rebolos e foram adicionadas ao software desenvolvido. A Figura 5.1 apresenta um descritivo do método adotado para construção das texturas tipo linear. O ângulo formado (α) é definido no programa de texturização, sendo a razão entre os ângulos de fase das ondas (anterior e sequente).

Figura 5.1 – Metodologia para texturização tipo linear.

Os outros parâmetros de ensaio foram mantidos iguais ao ensaio anterior, para então avaliação comparativa dos resultados. Abaixo encontram-se descritos estes e também o mapa acústico (Figura 5.2) obtido durante a texturização do rebolo.

- Material do corpo de prova: Silcrome
- Velocidade de corte (v_s): 30m/s
- Largura de dressagem (b_d): 0,115 mm
- Profundidade de dressagem (a_d): 20 μ m
- Velocidade de dressagem (v_d): 156,40 mm/s
- Relação R: 10
- Material removido: 30 μ m (no diâmetro)
- Amplitude da onda seno: 5,0 volts
- Ganho operacional *Shaker*: 3
- Textura escolhida: ranhura linear

Figura 5.2 - Mapa acústico de dressagem, textura tipo linear.

Após texturização do rebolo foi então realizada a retificação cilíndrica de mergulho na peça para remoção do material e transcrição das texturas. O resultado atingiu os objetivos esperados. A região facetada deixou de existir, sendo comprovada pelas análises de circularidade e cilíndricidade (Figura 5.3). Foi possível também executar com sucesso a operação de *spark-out*, o que representou melhoria considerável na qualidade superficial e geométrica da peça.

Figura 5.3 – Análise superficial da peça texturizada, circularidade e cilindridade respectivamente.

Com os resultados conclusivos de sincronização durante a retificação, foi então avaliada a razão pela qual as rotações se mantiveram perfeitamente sincronizadas durante todos os ciclos de corte. Este parâmetro representa uma importante constatação para avaliação dos limites de aplicação do método. Procurou-se comprovar se há necessidade de um sistema de precisão para posicionamento angular do rebolo e peça ou se o processo em si promove esta sincronização. A capacidade de auto-sincronização do sistema pode ocorrer caso rebolo e peça mantenham suas velocidades constantes ao longo do processo de corte. Neste caso, as texturas são transferidas a superfície da peça. No caso de perda desta sincronização, o rebolo deve retificar a peça sem transcrição. Sem sincronismo de posicionamento angular, as texturas seriam posicionadas em diferentes pontos a cada revolução da peça, o que não transcreveria precisamente o padrão desejado.

Foram executados dois ensaios para avaliação da auto-sincronização. Os testes diferem apenas quanto a Relação R utilizada. A primeira peça foi texturizada de maneira sincronizada, utilizando uma Relação R igual a 10. O segundo teste foi feito com uma Relação R igual a 10,3, estabelecendo assim uma condição de não-sincronização (30% defasado em cada rotação da peça em relação ao rebolo). Para monitoramento e análise da sincronização foram instalados dois sensores magnéticos indutivos, um junto ao porta-rebolo da retificadora e outro na fixação da peça, possibilitando assim aquisição da posição angular do rebolo e da peça respectivamente. Além deste parâmetro foi monitorada também a potência de

retificação para avaliação da influência das forças de corte na velocidade do rebolo e peça durante os estágios da retificação.

Para estes ensaios, outra textura foi criada utilizando ondas senoidais. Neste caso, foi escolhido fazer texturização tipo linear combinada o deslocamento transversal do dressador na face do rebolo. Desta forma, criaram-se duas orientações, uma com o deslocamento da esquerda para a direita e outro ao inverso. Ao se cruzarem, as linhas criaram uma textura tipo recartilhado, sendo uma opção para se obter uma superfície de corte com redução significativa da área de contato entre a peça e o rebolo. A Figura 5.4 representa graficamente esta metodologia para criação da textura tipo recartilhado.

Figura 5.4 – Metodologia para texturização tipo recartilhado.

Segue descrição das condições para ambos os ensaios e figura representativa do mapa acústico de texturização do rebolo (Figura 5.5):

- Velocidade de corte (v_s): 30m/s
- Largura de dressagem (b_d): 0,13 mm
- Profundidade de dressagem (a_d): 20 μ m
- Grau de recobimento (u_d): 3
- Material removido: 200 μ m (no diâmetro)

- Amplitude da onda seno: 5,0 volts
- Ganho operacional *Shaker*: 2,5
- Textura escolhida: recartilhado

Figura 5.5 – Mapa acústico de dressagem, textura tipo recartilhado.

Após operação de texturização da ferramenta de corte, foi então realizada a retificação das peças para transcrição das texturas e monitoramento para avaliação da sincronização. A primeira peça foi retificada com a relação R inteira, ou seja, sincronizada. A posição angular da peça e do rebolo foi monitorada para avaliação do ângulo relativo entre as superfícies, denominado ângulo de fase. Além deste parâmetro, foi avaliada a variação do ângulo de fase, informação para comprovação do sincronismo. A potência de corte também foi monitorada para orientar as avaliações desta etapa. Os dados obtidos do monitoramento destes três parâmetros durante operação de texturização sincronizada estão apresentados na Figura 5.6. Os resultados da texturização não sincronizada são representados na Figura 5.7.

Figura 5.6 – Ângulo de fase, variação do ângulo de fase e potência de corte durante texturização sincronizada.

A retificação sincronizada apresentou comportamento de acordo com o esperado. Na Figura 5.6 é possível verificar que o ângulo de fase não se manteve constante ao longo do processo de corte. O esperado era que a mesma se mantivesse constante, para preciso sincronizamento entre a peça e o rebolo. Entretanto, analisando conjuntamente a potência de corte com a variação do ângulo de fase pode-se notar um comportamento análogo. Esta constatação descreve o comportamento esperado num processo de retificação, onde a velocidade de rotação do rebolo tende a alterar devido às forças de corte.

As constatações desta análise demonstraram que na verdade a sincronização não é mantida como esperado. Na verdade, ao longo do corte as texturas tendem a se deslocar no sentido contrário a rotação da peça. Isto foi revelado devido alteração do ângulo de fase entre rebolo e peça durante o corte apenas, sendo não mais observada durante o processo de faiscamento. O deslocamento das texturas no sentido contrário não influenciou a transcrição precisa das mesmas, pelo motivo de que material foi removido e novas texturas foram inscritas a cada revolução.

Por fim, com redução significativa das forças ao fim do corte, a estabilidade de sincronismo é estabelecida novamente, como em instantes iniciais ao corte, fornecendo acabamento e proporcionando a transcrição perfeita das mesmas a

superfície da peça. Esta constatação foi comprovada ao analisar em conjunto os resultados da Figura 5.7.

Figura 5.7 – Ângulo de fase, variação do ângulo de fase e potência de corte durante texturização não sincronizada.

A condição estabelecida inicialmente de 30% de defasagem a cada revolução, ou seja, 108° foi mantida ao longo do processo de retificação. A variação teve pouca variação e o ângulo de fase foi incremental segundo a condição estabelecida. Desta forma, mesmo na fase de início de retificação, com baixas forças de corte, a condição de não-sincronismo impossibilitou que as texturas fossem inscritas da superfície da peça. Mesmo com alterações na relação de rotação, a condição foi mantida devido as texturas não serem transcritas precisamente a peça. Ao fim da retificação, o faiscamento proporcionou alteração significativa na relação de rotação, devido choque entre as texturas do rebolo e peça.

Por fim, ao analisar a superfície da peça retificada na condição de não-sincronismo, pode-se comprovar que as texturas não foram inscritas. Comprovando que somente numa condição de sincronismo as texturas tornam o sistema (rebolo-peça) capaz de se auto ajustar. De maneira a alterar a relação de rotação devido aos esforços, porém retomar a condição com a redução das forças.

Estes resultados comprovaram a proposição de que o sistema se auto ajusta durante o processo de corte, não sendo necessária instalação de sistemas para

garantir precisão de posicionamento angular entre a peça e o rebolo. Ao estabelecer uma rotação inicial inteira, esta foi mantida e obteve-se com precisão a textura superficial desejada. Esta avaliação apontou que a texturização pode ser utilizada em retificadoras com comando numérico comum, sem necessidade de dispositivos precisos para controle posicional angular da peça e do rebolo. Esta constatação experimental atende a compatibilidade do método com as retificadoras habitualmente utilizadas nas indústrias em geral.

5.2. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DA METODOLOGIA PARA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS

Comprovada a funcionalidade da texturização e também a auto-sincronização durante o processo de corte, foi então iniciada a etapa de ensaios para avaliação dos parâmetros operacionais do método proposto. Nesta etapa específica foi avaliada a capacidade do método e dos dispositivos utilizados para produção de texturas variadas. Além disso, a relação R , o grau de recobrimento U_d e a constante de atraso (*Mult. Const.*) foram avaliadas para composição dos parâmetros operacionais do método.

Nesta fase de pesquisa, foram levantados alguns padrões de textura de maneira a avaliar a capacidade do método proposto e também dos dispositivos utilizados. Para atender a este objetivo, o software desenvolvido para controle dinâmico da profundidade de dressagem foi adaptado para possibilitar construção de novas texturas. Além desta capacidade, o software também foi adaptado para utilizar os parâmetros de dressagem U_d e b_d para composição das texturas, possibilitando que combinações destes sejam avaliadas.

As texturas desenvolvidas foram: ranhura senoidal, ranhura triangular, canais para lubrificação (pockets), recartilhado e linear. Estas foram criadas com metodologia similar as anteriores, utilizando o ângulo de fase como parâmetro. Consiste, basicamente, na alteração deste parâmetro seguindo padrões variados. Desta forma, foi explorado a capacidade de se utilizar ondas senoidais para criação de texturas variadas. A cada interação uma nova versão do software foi criada para então tornar possível a criação da textura desejada.

As texturas foram escolhidas levando em consideração as possíveis aplicações práticas da texturização de rebolos. Inicialmente foi avaliada apenas a

capacidade das ferramentas desenvolvidas para a construção das texturas propostas. Para devida comparação dos resultados de cada texturização, foram mantidos constantes os principais parâmetros de operação, descritos abaixo.

- Material: Silcrome;
- Velocidade de corte (v_s): 30m/s;
- Largura de dressagem (b_d): 0,115 mm;
- Profundidade de dressagem (a_d): 20 μ m;
- Grau de recobrimento (U_d): 1;
- Relação R: 10;
- Sobremetal: 40 μ m;
- Amplitude da onda seno: 5,0 volts;
- Ganho operacional *Shaker*: 3;

O resultado desta fase experimental está representado na Figura 5.8 e na Figura 5.9. A Figura 5.8 representa a texturização do rebolo durante a dressagem, de acordo com os respectivos padrões propostos e obtidos. A profundidade das texturas foi avaliada através da dressagem monitorada por emissão acústica, sendo observado um valor comum de aproximadamente 15 μ m para cada inscrição. Todas foram inscritas ao longo da superfície do rebolo (360°) e por toda largura do mesmo, 50mm.

Figura 5.8 – Mapa acústico de texturização (texturas variadas).

Após a texturização da ferramenta com o padrão escolhido, foi então realizada retificação cilíndrica de mergulho para transcrição destas na superfície da peça. Estes resultados estão representados na Figura 5.9, indicando os respectivos mapas e o resultado na superfície da peça. Para fins comparativos está também representada uma peça retificada com rebolo sem textura. Todas as peças foram retificadas com a face completa do rebolo – 50mm e foram removidos 40 μ m de material no diâmetro de cada. A profundidade destes na superfície da peça atingiu valores variados de acordo com cada textura, variando entre 5 μ m e 10 μ m de profundidade.

Figura 5.9 – Texturização da peça (texturas variadas).

Ao final desta avaliação experimental, o sistema provou-se funcional e os padrões de textura escolhidos puderam ser precisamente inscritos no rebolo e na superfície da peça. Os próximos ensaios foram executados para avaliação experimental de alguns dos parâmetros do método. O primeiro parâmetro avaliado foi o grau de recobrimento (U_d) utilizado na texturização. O grau de recobrimento possui influência no desempenho do corte em si, sendo necessário ser experimentalmente avaliado e o software deve ser capaz de construir texturas com as condições de corte estabelecidas. Estes valores foram levantados baseados na literatura da área, classificados como valores para condição de corte para desbaste, acabamento e intermediário. A combinação destes está apresentada abaixo:

- $U_d = 1$ – condição para desbaste;
- $U_d = 6$ – condição para acabamento;
- $U_d = 3$ – condição intermediária;

A textura escolhida para estes ensaios foi canais para lubrificação (pockets), devido à relação direta entre o grau de recobrimento e a forma final das texturas. O mapa acústico de dressagem para texturização do rebolo está representado na Figura 5.10, junto dos resultados observados visualmente na superfície da peça após retificação com rebolo condicionado.

Figura 5.10 – Avaliação do Grau de Recobrimento na texturização (textura tipo pockets).

Independente da condição avaliada foi possível observar nas peças a devida transcrição das texturas de acordo com o padrão escolhido, comprovando a funcionalidade do processo de texturização e do *software* independente da condição de dressagem utilizada. Porém, a qualidade superficial foi diretamente afetada pela condição de corte do rebolo. Comparativamente os resultados demonstraram que na condição de acabamento a capacidade de remoção diminuiu e nas regiões onde há textura foi observada queima da superfície da peça. Na condição de desbaste estas não foram observadas, porém o acabamento superficial apresentou-se comparativamente pior. A condição então intermediária foi a que apresentou melhor resultado de qualidade superficial, sem queima nas texturas, e também superior acabamento. O resultado desta análise comprova a influência do grau de recobrimento na qualidade superficial das peças texturizadas, resultado que orientou a composição da aplicação da texturização como ferramenta para otimização do processo de retificação – apresentado na próxima seção deste capítulo.

Outro parâmetro avaliado foi a constante de atraso (*Mult. Const.*) necessária para sincronização precisa da posição angular do rebolo com o sinal de atuação enviado ao atuador para texturização do rebolo durante a dressagem. A constante é necessária para assegurar que o sistema seja capaz de monitorar a posição angular do rebolo, calcular o sinal de atuação para esta posição e encaminhar este ao

atuador. Trata-se de um processo interativo que ocorre durante toda a dressagem do rebolo, sendo dependente exclusivamente da capacidade de processamento de dados do computador utilizado. O valor utilizado nos ensaios anteriores foi de 1,2, ou seja, 20% de diferença entre a posição angular do rebolo e o sinal de atuação. Este valor foi empírico, sendo então necessária uma avaliação experimental para composição do valor final a ser utilizado nas próximas etapas. Para este fim, foram realizados testes para monitoramento da sincronização de acordo com o valor da constante utilizado. O resultado apontou que o a constante deve ser de 25%, ou seja, 1,25, valor onde nenhuma onda deixou de ser gerada sincronizadamente com o rebolo.

Por fim, como último parâmetro operacional a ser avaliado, a relação de velocidade de rotação entre o rebolo e a peça (relação R) foi testada. Os ensaios tiveram o objetivo principal de mensurar a influência da relação com a dimensão final das texturas na superfície da peça retificada. Este resultado será utilizado para composição da fórmula final para relacionar as dimensões das texturas obtidas na superfície da peça com as inscritas na superfície do rebolo. Foram realizados dois ensaios, cada um com uma relação R diferente ao outro, porém mantidos todos os outros parâmetros operacionais e textura. De maneira a tornar os resultados superficiais visíveis, foi utilizado marcador industrial vermelho para destaque e contraste. As relações R avaliadas foram: 10 e 5 respectivamente. A textura escolhida para avaliação foi tipo recartilhado, homogeneamente espalhada ao longo da circunferência do rebolo. Segue a Figura 5.11 com o mapa acústico de dressagem para inscrição da textura e resultados do primeiro e segundo ensaio.

Figura 5.11 – Avaliação experimental da relação R igual 10 e 5, respectivamente.

A Figura 5.12 representa também um defeito nas texturas ocasionado pela região onde não há geração de texturas. Devido a constante de atraso, *Mult. Const.*, uma região não é texturizada, ficando sujeita a vibrações resultantes do excitador mecânico. Contudo estas também foram transmitidas a peça, como também pode ser observado.

Figura 5.12 – Defeito observado devido a *Mult. Const.* (constante de atraso).

Estes resultados proporcionaram que uma fórmula matemática, para correlacionar os valores dimensionais das texturas na superfície do rebolo e da peça, fosse determinada (OLIVEIRA, BOTTENE e FRANÇA, 2010). Um importante fator ao utilizar a metodologia para criação de texturas superficiais precisas na superfície de uma peça retificada, outra principal aplicação da mesma. A Figura 5.13 ilustra este resultado e também apresenta a fórmula.

Ao utilizar uma relação R inteira e constante ao longo de todo o processo de corte, a mesma representou o número preciso de vezes que o padrão de textura foi

transcrito a superfície da peça. Desta forma, a largura da textura na superfície do rebolo é igual a relação R (divisão da velocidade de rotação do rebolo pela velocidade de rotação da peça) vezes a largura da textura na superfície da peça. A Figura 5.13 representa graficamente a formulação estabelecida.

Figura 5.13 – Representação gráfica da formulação da relação R (OLIVEIRA, BOTTENE e FRANÇA, 2010).

Ao fim destas etapas para avaliação experimental e comprovação do método inovador proposto, foi então realizada a segunda etapa de desenvolvimento.

5.3. INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO NO DESEMPENHO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO – APLIAÇÃO DO MÉTODO DESENVOLVIDO

Após todas as fases de desenvolvimento do método, foi proposta uma aplicação prática para comparação deste com outras tecnologias de usinagem disponíveis. A aplicação proposta foi utilizar este método como ferramenta para melhoria do desempenho do processo de retificação. Visto que a texturização é capaz de controlar, com relativa precisão, a superfície do rebolo, este método pode ser aplicado para composição de padrões de alto desempenho na superfície da

ferramenta de corte. Estes auxiliam na remoção de material, dinâmica do fluido de corte e remoção de cavacos, proporcionando melhores condições de corte durante a retificação. Alguns dos métodos estão presentes na revisão bibliográfica e serão utilizados como comparação ao desempenho da texturização para este fim.

As pesquisas na área de retificação comprovaram ao longo do tempo a relação direta entre a qualidade superficial da ferramenta abrasiva e o desempenho do processo de corte. O processo responsável por manter o controle entre estes dois parâmetros é a dressagem. A dressagem promove alteração da superfície da ferramenta abrasiva de maneira a manter a afiação da mesma ao longo do processo produtivo, bem como outros parâmetros do rebolo.

A técnica desenvolvida para construção de texturas na superfície do rebolo proporciona um fator até então pouco estudado na área. Através da alteração da profundidade de dressagem ao longo do processo de condicionamento do rebolo, é possível construir superfícies customizadas no perímetro da ferramenta que possuam impactos positivos no desempenho do processo de corte; tais como: canais para auxiliar na refrigeração do processo de corte, ou macro-efeito de arestas para auxiliar na formação e remoção de cavacos da superfície da peça retificada; entre outros. Com intuito de testar estas possibilidades, os seguintes testes foram executados.

Os primeiros ensaios foram executados com o objetivo de obter a melhor condição para uso da metodologia, porém com condições de qualidade superficial comparadas às obtidas pelo processo de retificação convencional. Os resultados obtidos para avaliação da auto-sincronização durante a texturização apontaram a necessidade de se utilizar uma condição não sincronizada para estes ensaios. Nesta condição, as texturas não devem ser transferidas para a superfície da peça durante o corte, mantendo assim as condições comparativas à retificação comum. Para então avaliação destas condições, foram propostos quatro testes: retificação com rebolo sem textura (padrão de comparação); retificação com rebolo texturizado e com sincronização; retificação com rebolo texturizado mas sem sincronização; e retificação com rebolo texturizado e com sincronização variável (relação R). Estas proposições foram baseadas nos ensaios realizados para avaliação da sincronização. A medida de qualidade superficial escolhida para comparação foi a circularidade. A Figura 5.14 representa os resultados obtidos.

Legenda:

Teste 1 – Retificação sem texturização (padrão)

Teste 2 – Retificação com texturização – sincronizada / R=10

Teste 3 – Retificação com texturização – não sincronizada / R=10.3

Teste 4 – Retificação com texturização / relação R variável

Figura 5.14 – Avaliação da qualidade superficial em relação a condição de texturização.

Os resultados demonstraram que a melhor opção consiste em utilizar a condição de relação R variável durante o corte. Ou seja, ao proporcionar corte inicialmente sincronizado as texturas foram precisamente inscritas na superfície da peça, porém estas foram então removidas pela alteração da relação de rotação na etapa de faiscamento, visível através da análise do mapa acústico de retificação. Através deste processo foi possível atender a valores de circularidade próximos à retificação convencional, conforme apresentado na Figura 5.14.

Os próximos testes foram executados para avaliação do desempenho do processo de texturização de rebolo em comparação à retificação comum. Neste caso, o objetivo também não é texturizar a peça, mas avaliar como as texturas podem beneficiar o processo de retificação. Os parâmetros de operação escolhidos para comparação foram circularidade, rugosidade e a potência de retificação média. A potência de retificação média foi medida pelo sinal proporcional analógico obtido no inversor de frequência do motor do rebolo. Foram realizados 60 mergulhos incrementais de 200µm de profundidade para composição da potência média de retificação e também avaliação do desgaste do rebolo após ciclo de corte. As quatro

texturas escolhidas para a avaliação do desempenho foram: ruído branco com frequência abaixo de 50Hz (T2), canais triangulares (T3), canais lineares (T4) e recartilhado (T5). Para comparação dos dados obtidos foi também realizada retificação comum (T1), sem texturização, nas mesmas condições utilizadas nos ensaios com textura. Segue descrição dos parâmetros utilizados para todos os ensaios:

- Material: SAE4340 (45Rc);
- Diâmetro inicial da peça: 25mm;
- Rebolo: 38A-80-KVHB
- Velocidade de corte (v_s): 30m/s;
- Largura de dressagem (b_d): 0,115 mm;
- Profundidade de dressagem (a_d): 20 μ m;
- Ganho do *shaker*: 2,5;
- Amplitude seno: 5 volts;
- a_d : 20 μ m;
- b_d : 0,07 mm;
- Constante: 1,25;
- Material removido: 60 ciclos de 50 μ m de profundidade e 20mm de largura cada;
- *Spark-out*: 5 segundos;
- Avanço: 0,5 mm/min;

Os resultados estão representados na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Resultados obtidos para melhoria do desempenho do processo de retificação através do processo de texturização.

A textura tipo ruído branco foi escolhida com base em resultados encontrados na literatura. Esta textura deve apresentar condições de corte com potência de retificação inferior as condições normais, fato este observado nos resultados obtidos. Foi observada redução considerável na potência de corte e baixa perda de qualidade superficial, dados estes que proporcionaram confiabilidade da análise referente às texturas escolhidas e metodologia adotada.

Todas as texturas avaliadas apresentaram redução na potência de retificação. Sendo as texturas com menor área de contato, tipo linear e recartilhado, as condições com menor potência requerida, cerca de 30% menor. A qualidade superficial foi inversamente proporcional, sendo os piores resultados apresentados nas mesmas condições. Estes resultados confirmaram a proposição inicial de aumento da agressividade da ferramenta de corte através da criação deste macro efeito de textura na superfície do rebolo. Comparativamente foi possível estabelecer uma condição com considerável ganho de potência e pequena perda de qualidade superficial junto à peça retificada.

Dentro destas condições de ensaios foi também avaliado o impacto das texturas na vida da ferramenta de corte. Esta análise representa um importante fator para comprovação do controle de desempenho do processo de retificação com uso de texturização. Foi avaliada a vida da ferramenta no caso em que se obteve melhor resultado de potência, a textura tipo recartilhado. Este resultado foi comparado com a condição padrão, ou seja, sem nenhuma textura. A análise foi executada durante a dressagem do rebolo após execução dos 60 ciclos de retificação de mergulho, sendo monitorado o sinal de emissão acústica durante cada passo de dressagem para avaliação do mapa acústico. A profundidade de dressagem de cada passo foi de $2\mu\text{m}$, tornando possível a comparação dos resultados para então avaliação do desgaste obtido na superfície do rebolo. A Figura 5.16 representa os resultados obtidos, em detalhe a faixa localizada a direita nos 3 primeiros passos de dressagem. Esta faixa condiz com a largura do rebolo utilizada nos ciclos de retificação, 20mm.

Figura 5.16 – Mapas acustico para avaliação do desgaste do rebolo após ciclos de retificação.

Os apontamentos práticos demonstraram que o desgaste da ferramenta de corte, nas condições utilizadas, foi comparativamente similar. Os gráficos de mapeamento por emissão acústica apresentaram a mesma profundidade de desgaste devido aos 60 ciclos de retificação. Os passos incrementais de dressagem também comprovaram que este desgaste foi mais evidenciado apenas no primeiro passo e, portanto, com magnitude de desgaste de 2 μ m.

Os resultados obtidos nesta fase final atenderam por completo os objetivos propostos. A metodologia para texturização através do processo de dressagem foi capaz de reduzir a potência de retificação, manter relativamente próximos os valores de qualidade superficial da peça final e também o desgaste do rebolo. Estas constatações experimentais comprovam o uso do método não somente como mecanismo para construção de texturas controladas em peças através da retificação, mas também a adoção deste como método para otimização e controle do processo de corte em si.

6 CONCLUSÃO

A metodologia proposta para inscrição de texturas controladas na superfície do rebolo através do processo de retificação foi desenvolvida e experimentalmente avaliada. Para executar esta avaliação foi também proposto um sistema capaz de alterar dinamicamente a profundidade de dressagem ao longo do processo. Esta montagem possibilitou executar a metodologia proposta e os resultados desta construção foram apresentados na seção 4 desta dissertação.

Os resultados de sucesso desta primeira avaliação possibilitaram a composição do banco de ensaio para avaliação das duas principais aplicações da metodologia proposta. Os apontamentos de trabalhos na área de retificação foram utilizados como base para proposição do uso desta metodologia como ferramenta para controle de desempenho do processo de retificação em si. Foram propostas quatro diferentes texturas para auxiliar no processo de corte. Em comparação a retificação com rebolo sem textura, a potência de retificação foi menor em todos os casos propostos, sendo até 25% menor no caso com melhor resultado. Entretanto a qualidade superficial, avaliada através da circularidade e rugosidade, se manteve relativamente estável, sofrendo pouca influência das texturas avaliadas.

Ao utilizar da metodologia proposta para construção de uma superfície de rebolo customizada para melhoria de desempenho do corte, os resultados atenderam aos objetivos propostos. A potência de retificação diminuiu e os valores de qualidade avaliados atingiram níveis esperados. Adicionalmente, a vida do rebolo também não apresentou alteração significativa dentro das condições experimentadas. Estes resultados comprovam que utilizando o mesmo rebolo, diversas condições podem ser criadas para atender às condições de corte do material a ser usinado, ampliando consideravelmente, a gama de aplicação do mesmo rebolo. Em complemento, a redução na potência de retificação representa aumento da capacidade de corte, outro representativo ganho ao se utilizar da metodologia proposta.

Complementar a estes resultados, o método proposto também possibilitou a inscrição de texturas na superfície da peça retificada. Diversos padrões puderam ser gerados na ferramenta de corte através da dressagem e estes foram transcritos a superfície da peça durante a retificação. A proposição inicial de se adotar um sistema de posicionamento angular entre o rebolo e a peça durante a retificação

para inscrição precisa das texturas foi verificada como desnecessária. Os resultados comprovaram a viabilidade de uso de um método de auto ajuste, de maneira a manter uma condição de sincronismo. A condição estabelecida inicialmente de relação inteira entre as velocidades de rotação da peça e do reboło (Relação R) garantiu o sincronismo, mesmo com a remoção de material.

Os resultados do uso da texturização de rebolos como método para inscrição de texturas em peças demonstram sua capacidade como alternativa viável para este processo. Ao se utilizar de pequenas adaptações em uma retificadora já comumente utilizada para manufatura de peças mecânicas, ao invés de outro processo, como laser ou eletroerosão, os custos associados serão certamente menores.

A avaliação dos resultados obtidos comprovou a funcionalidade do sistema e método proposto. Como resultado desta comprovação, foi documentada a inovação junto ao INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) recebendo número de patente PI 0804585-2 e título: "PROCESSO DE TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL DE PEÇAS RETIFICADAS COM USO DE REBOLO CONDICIONADO ATRAVÉS DA ALTERAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE DRESSAGEM" (OLIVEIRA, BOTTENE, *et al.*, 2008).

Melhorias devem ser executas para avaliar uso de outros tipos de mecanismos para prover movimento controlado da profundidade de dressagem. Entretanto, ao se escolher esta montagem com um dispositivo instalado externamente a retificadora não foi alterada a rigidez da fixação do dressador. Este fato proporcionou que as condições já asseguradas pelo fabricante da retificadora pudessem ser mantidas. Sendo imprescindível, ao avaliar outro mecanismo de movimentação, capacitá-lo para atender as mesmas condições.

O *software* desenvolvido para operação e controle deste sistema foi continuamente adaptado para ser utilizado nas diversas condições que venham a ser necessárias. As ultimas versões desenvolvidas são capazes de gerar o sinal de atuação baseado nas condições de dressagem escolhida. Esta adaptação possibilitou a mesma ferramenta seja utilizada em diversas condições de dressagem. Devido às limitações do atuador escolhido, mesmo a ultima versão utilizou sinais senoidais para composição das texturas na superfície do reboło, sendo necessário para os aprimoramentos futuros alterar este modelo de geração e também o algoritmo de sincronização escolhido. Devido a combinação destes dois pontos não foi possível eliminar a região do reboło onde não há inscrição de

texturas, representada pela *Mult. Constant*. Para os resultados finais esta região foi de 20 a 25% de toda área superficial do rebolo, dependendo das condições de textura a ser executada.

Por fim, a formulação proposta para cálculo das ondas geradas para inscrição no rebolo foi também experimentalmente comprovada. Os resultados comprovaram a fórmula desenvolvida, que foi utilizada para composição das texturas deste trabalho e podem ser utilizadas para outras necessidades de projeto.

Todos estes resultados comprovam a capacidade do método proposto para atender aos dois principais problemas encontrados no processo de retificação de precisão. São eles:

- 1 Melhoria do desempenho do processo de retificação através do uso de rebolos texturizados;
- 2 Capacidade de se utilizar a retificação como processo para inscrição de texturas em peças usinadas.

O método inovador para texturização de rebolos proporcionou melhoria do desempenho do processo de retificação (1) e também validou a retificação como processo alternativo viável para construção de superfícies texturizadas em peças mecânicas.

7 BIBLIOGRAFIA

ALAGUMURTHI, N.; PALANIRADJA, K.; SOUNDARARAJAN, V. Cylindrical grinding - A review on surface integrity. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 8, n. No.3, p. 24-44, 2007.

BIANCHI, E. C. **Ação das condições de dressagem na vida de rebolos na retificação de precisão**. São Carlos: Dissertação de mestrado apresentada à Escola de engenharia de São Carlos-USP, 1990.

BRUZZONE, A. A. G. et al. Advances in engineered surfaces for fuctional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, p. 750-769, 2008.

CHEN, X. et al. Analysis and simulation of the grinding process. Part IV: Effects of wheel wear. **International Journal Machine Tools Manufacturing**, v. 38, n. No. 1-2, p. 41-49, 1998.

CHEN, X.; ROWE, W. B. Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 36, n. 8, p. 871-882, 1996.

COELHO, R. T. **Estudo experimental da profundidade de dressagem de rebolos na retificação de precisão usando método do disco retificado**. São Carlos: Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1991.

DENKENA, B.; BOEHNKE, D.; KÄSTNER, J. Microstructuring of fuctional sufaces by means of cutting process. **Production Engineering Research and Development**, v. 2, p. 21-25, 2008.

ETSION, I. State of the art in laser surface texturing. **Journal of Tribology - Technology Review**, v. 127, p. 248-253, 2005.

GOLLOCH, R.; MERKER, G. Functional properties of microstructured cylinder liner surfaces for internal combustion engines. **Tribotest Journal**, v. 11, n. 4, p. 307-324, 2005.

GRAHAM, W.; VOUTSADOPOULOS, C. M. Fature wear of grinding wheels. **International Journal of Machine Tools Design and Research**, v. 18, n. 2, p. 95-103, 1978.

HASHIMOTO, H.; OCHIAI, M. Optimization of groove geometry for thrust air bearing to maximize bearing stiffness. **Journal of Tribology - Transactions of the ASME**, v. 130, n. 3, p. 031101, 2008.

HEINZEL, C.; RICKENS, K. Engineered wheels for grinding of optical glass. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 315-318, 2009.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. Microscale wear of vitrified abrasive materials. **Journal of Materials Science**, v. 39, p. 2131-2143, 2004.

KIM, J.-D. et al. Development of discontinuous grinding wheel with multi-porous grooves. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 37, n. 11, p. 1611-1624, 1997.

- KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding - A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, p. 278-284, 2006.
- LEE, K. W.; WONG, P. K.; ZHANG, J. H. Study on the grinding of advanced ceramics with slotted diamond wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 100, n. 1-3, p. 230-235, 2000.
- MALKIN, S. **Grinding technology**: theory and applications of machining with abrasives. 1. ed. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1989.
- NAKAYAMA, K.; TAKAJI, J.; ABE, T. Grinding wheel with helical grooves - An attempt to improve the grinding performance. **Annals of the CIRP**, v. 25, n. 1, p. 133-138, 1977.
- OLIVEIRA, J. F. G. **Análise da ação do macroefeito de dressagem no desempenho do processo de retificação**. São Carlos: Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1988.
- OLIVEIRA, J. F. G. et al. **Processo de texturização superficial de peças retificadas com uso de rebolo condicionado através da alteração da profundidade de dressagem**. PI0804585-2, 2008.
- OLIVEIRA, J. F. G.; BOTTENE, A. C.; FRANÇA, T. V. A novel dressing technique for texturing of ground surfaces. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. n.1, p. 361-364, 2010.
- OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D. A. Application of AE contact sensing in reliable grindig monitoring. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 217-220, 2001.
- PETTERSSON, U.; JACOBSON, S. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique. **Tribology International**, v. 39, p. 695-700, 2006.
- TUNG, S. C.; MCMILLAN, M. L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. **Tribology International**, v. 37, p. 517-536, 2004.
- WINTER ABRASIVOS BRASIL. **Informativo Técnico - Dressadores Estáticos**. [S.l.]: [s.n.], v. 7, 2003.
- WINTER ABRASIVOS BRASIL. **Informativo Técnico - Dressadores Rotativos Diamantados**. [S.l.]: [s.n.], v. 8, 2003.
- XUE, L.; NAGHDY, F.; COOK, C. Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding. **IEEE ICIT'02**, Bangkok, 2002. 1296-1299.