ALEX CAMILLI BOTTENE

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TEXTURIZAÇÃO PARA
APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE MANCAIS DE VIRABREQUINS

São Carlos

2018

ALEX CAMILLI BOTTENE

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TEXTURIZAÇÃO PARA
APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE MANCAIS DE VIRABREQUINS

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,
como requisito para a obtenção do Título de
Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Processos e Gestão de
Operações – Processos Avançados de
Manufatura e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Tit. João Fernando Gomes de
Oliveira

São Carlos

2018

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B374d Bottene, Alex Camilli
 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TEXTURIZAÇÃO PARA
APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE MANCAIS DE VIRABREQUINS /
Alex Camilli Bottene; orientador João Fernando Gomes
de Oliveira. São Carlos, 2018.

 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Área de Concentração em
Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

 1. Texturização superficial. 2. Retificação. 3.
Dressagem. 4. Mancais hidrodinâmicos. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALEX CAMILLI BOTTENE**.

Título da tese: "Desenvolvimento de um sistema de texturização para aplicação na fabricação de mancais de virabrequins".

Data da defesa: 27/04/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **João Fernando Gomes de Oliveira**
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Thiago Valle França**

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Aprovado

Prof. Dr. **Alessandro Roger Rodrigues**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Rodrigo Nicoletti**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Eduardo Carlos Bianchi**

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção:

Prof. Associado **Aldo Roberto Ometto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

DEDICATÓRIA

*A minha adorável mãe por duas
gerações, vovó Luiza.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Tit. João Fernando Gomes de Oliveira, agradeço sua postura, que transgrediu as barreiras de orientador acadêmico, para dedicar seu potencial também na motivação, discussão e formação de um excelente egresso.

Ao Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva, agradeço as discussões sobre os resultados, métodos e experimentos realizados, sob sua coordenação e ajuda.

Ao Prof. Tit. Reginaldo Teixeira Coelho, agradeço o apoio fornecido com toda infraestrutura do LAPRAS e sempre orientação, com a experiência de sua carreira notável.

Aos colegas da empresa ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo Paulista, parceiros industriais deste trabalho, agradeço a excelente oportunidade. Em especial, os senhores Robson Ferreira e Almir Atoatte, mentes empreendedoras que acreditaram no potencial e tornaram possível esta parceria.

Ao colega de pós-graduação e parceiro de pesquisa Gustavo Pollettini Marcos, que dedicou intenso apoio ao projeto, agradeço a amizade e companheirismo nesta longa jornada.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade – LAPRAS, equipe sem igual que tornou a dedicação a este trabalho um momento de descontração e superação, agradeço a amizade e apoio.

A minha querida família, agradeço a compreensão pela ausência e sempre motivação que me proporcionaram.

Aos amigos de longa data, sem endereço e distinção, agradeço aos papos descontraídos, brincadeiras e ideias fora da caixa que colocaram o ânimo em dia e sorriso no rosto.

A Deus, agradeço a fé que me trouxe até aqui, não me deixou parar e me fortalece a seguir com os novos desafios que virão.

RESUMO

BOTTENE, A. C. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TEXTURIZAÇÃO PARA APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE MANCAIS DE VIRABREQUINS. 2018. 121 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A crescente demanda por redução de emissões leva a uma busca para melhorar o desempenho dos motores de combustão interna através de novas soluções de engenharia. A funcionalização das superfícies aplicadas aos mancais de virabrequins representa uma das possíveis soluções para alcançar este aprimoramento. A funcionalização adiciona à superfície texturas micrométricas para otimizar a dinâmica do lubrificante durante a operação, resultando em aumento na sustentação hidrodinâmica, melhor estabilidade e diminuição do atrito. O melhor desempenho dos mancais possibilita reduzir suas dimensões, proporcionando redução significativa do peso e do consumo de combustível. Nesta tese, a metodologia de texturização de rebolos é aplicada para produzir essas microestruturas específicas de alta precisão, para melhorar o desempenho da lubrificação do virabrequim. É proposto um modelo inovador para avaliar as restrições geométricas relacionadas à texturização com Retificação: a produção dos padrões na superfície do rebolo e o corte da superfície da peça durante a Retificação. Além disso, um projeto robusto de dressador dinâmico é apresentado para capacitar a inscrição durante a dressagem. Ambos os modelos foram testados e comparados aos resultados experimentais para validação. Como resultado, é apresentado um modelo de referência final com as orientações para produção de texturas com o processo de Retificação e as restrições associadas a este processo inovador de fabricação.

Palavras-chave: texturização superficial. Retificação. dressagem. mancais hidrodinâmicos.

ABSTRACT

BOTTENE, A. C. DEVELOPMENT OF A TEXTURING DEVICE FOR HYDRODYNAMIC BEARINGS APPLICATION. 2018. 121 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The up growing demand for lowering emissions leads to an effort to enhance internal combustion engines performance through new engineering solutions. The functionalization of surfaces applied to crankshaft bearings represents one of the possible solutions to achieve this balance. Producing a micrometric tailored texture on the surface to optimize the fluid dynamics in the bearing, increase load capacity, bearing stability and lower general operational losses. The better performance allows downsizing these bearings, enabling a possible significant reduction on weight and fuel consumption. In this work, the methodology for grinding wheel texturing is apply to produce these high precise particular microstructures for enhance the crankshaft lubrication performance. Therefore, a model for evaluating both geometrical limitations related to: the production of the patterns in the wheel surface; and the cutting of the part surface during grinding is presented. In addition, a model for evaluate the dynamic limitation of the piezoelectric actuator was also developed. Both models were tested and compared to experimental results do validate. As a result, a final reference model with the methodology limitations for the production of profiled parts via grinding is presented.

Keywords: texturing. grinding. dressing. hydrodynamic bearings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Superfície funcional tipo microrampa desenvolvida pela Thyssenkrupp.....	3
Figura 2-1 - Número de pesquisas no mundo sobre o tema texturização de superfícies.....	10
Figura 2-2 - Desempenho hidrodinâmico de perfis internos	14
Figura 2-3 - Seção transversal de rebolo com perfil helicoidal	17
Figura 2-4 - Metodologia de texturização com rebolo perfilado.....	18
Figura 2-5 - Texturização com rebolo perfilado por dressador rotativo perfilado	19
Figura 2-6 - Texturização com rebolo de ultra precisão para microtexturas em materiais frágeis	20
Figura 2-7 - Texturização com rebolo pré-fabricado com dispersão de grãos	21
Figura 2-8 - Texturização do rebolo com uso de eixo rápido instalado junto ao dressador.....	22
Figura 2-9 - Metodologia para texturização de superfícies com texturização de rebolos	22
Figura 2-10 - Metodologia de texturização baseada nos parâmetros da dressagem.....	23
Figura 2-11 - Texturas inscritas na peça após retificação cilíndrica com rebolo texturizado ..	24
Figura 2-12 - Estratégia para controle de rugosidade na texturização com retífica	25
Figura 2-13 - Modelo de contato com rebolo texturizado proposto por Stępień, (2009).....	26
Figura 2-14 - Resultado de previsão da simulação de texturização proposto por Kim e Ko (2015)	27
Figura 3-1 – Perfil de textura representado no plano de amplitude e posição perimetral do rebolo	31
Figura 3-2 - Geratrizes lineares para projeção de perfil no perímetro do rebolo	32
Figura 3-3 - Fluxograma da metodologia para Texturização de Rebolos	38
Figura 3-4 - Método para projeção das texturas na superfície do rebolo	39
Figura 3-5 - Modelo de cinemática de contato para retificação	40
Figura 3-6 - Representação esquemática das trajetórias de corte para um rebolo texturizado.	42
Figura 3-7 - Metodologia para Texturização com Processo de Retificação.....	44
Figura 3-8 - Dispositivo de atuação e seus elementos.....	45
Figura 4-1 - Projeção da textura microrampa (1:9) no tempo de atuação	48
Figura 4-2 - Curva de resposta do módulo amplificador PI E-481	50
Figura 4-3 - Módulo de dressagem dinâmica para a texturização	51
Figura 4-4 - Mapeamento por emissão acústica utilizado no monitoramento da texturização	52

Figura 4-5 - Sistema de controle de dressagem	53
Figura 4-6 - Montagem do sistema de texturização em Retificadora CNC cilíndrica	54
Figura 4-7 - Parametrização de textura para lubrificação – <i>dimples</i>	55
Figura 4-8 - Parametrização de textura para lubrificação – <i>chevron</i>	56
Figura 4-9 - Resultado de texturização parametrizada de forma <i>dimple</i>	57
Figura 4-10 - Resultado de texturização parametrizada de forma <i>chevron</i>	57
Figura 4-11 - Metodologia para fabricação de texturas por projeção	58
Figura 4-12 - Resultado de texturização por projeção	59
Figura 4-13 - Modelo de planificação e projeção para a geração de texturas tridimensionais	60
Figura 4-14 - Modelagem do perfil microrampa segundo segmentos de onda senoidal	61
Figura 4-15 - Metodologia para previsão da restrição do dressador dinâmico	63
Figura 4-16 - Simulação das trajetórias dos segmentos do rebolo durante a Retificação com texturização	66
Figura 4-17 - Visualização da profundidade de corte segundo as trajetórias simuladas	67
Figura 4-18 - Perfil simulado da textura reproduzida na superfície da peça durante a Retificação com rebolo texturizado.....	67
Figura 4-19 - Análise de reposta em frequência do dressador dinâmico em carregamento livre	70
Figura 4-20 – Mapas acústicos de passes de dressagem para determinar resposta em frequência do dressador dinâmico em operação	72
Figura 4-21 – Detalhe de um passe de dressagem para avaliação da resposta em frequência do dressador dinâmico durante a texturização	73
Figura 5-1 – Painel de controle e dispositivos instalados na retificadora CNC utilizada na experimentação	77
Figura 5-2 – Visão geral da retificadora CNC utilizada – Zema Numerika G-800-HS.....	77
Figura 5-3 - Painel de controle do software para texturização de microrampas.....	79
Figura 5-4 - Diagrama de blocos da função de sincronismo entre sinal analógico de geração e temporização	80
Figura 5-5 - Função de sincronismo longitudinal de texturização com sinal RMS de emissão acústica.....	81
Figura 5-6 - Amplitude de resposta do dressador dinâmico nas frequências de aplicação.....	84
Figura 5-7 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 1 ciclo por volta do rebolo	86

Figura 5-8 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 1 ciclo por volta do rebolo e relação de rotação 10	87
Figura 5-9 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 3 ciclos por volta do rebolo.....	88
Figura 5-10 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 3 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10.....	88
Figura 5-11 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 6 ciclos por volta do rebolo.....	89
Figura 5-12 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 6 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10.....	90
Figura 5-13 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 9 ciclos por volta do rebolo.....	91
Figura 5-14 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 9 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10.....	91
Figura 5-15 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 12 ciclos por volta do rebolo.	92
Figura 5-16 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 12 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10.....	93
Figura 5-17 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 17 ciclos por volta do rebolo	94
Figura 5-18 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 17 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10.....	95
Figura 5-19 - Análise das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40	97
Figura 5-20 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40	98
Figura 5-21 – Gráfico linear para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40.....	99
Figura 5-22 - Análise comparativa do perfil desejado (ou programado), simulado e obtido; perfil microrampa - relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40	100
Figura 5-23 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 2 por volta do rebolo e relação de rotação 20	103
Figura 5-24 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 2 por volta do rebolo e relação de rotação 20	104

Figura 5-25 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 4 por volta do rebolo e relação de rotação 10.....	105
Figura 5-26 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 4 por volta do rebolo e relação de rotação 10.....	105
Figura 5-27 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 20.....	108
Figura 5-28 - Medição de circularidade linear para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 20	109
Figura 5-29 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40.....	109
Figura 5-30 - Medição de circularidade linear para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 - Relação de trabalhos na área de engenharia de superfícies e suas aplicações	11
Quadro 2-2 - Processos de fabricação para texturização superficial com remoção de material	12
Quadro 4-1 - Parâmetros de operação para experimento de resposta em frequência livre	70
Quadro 4-2 - Parâmetros de texturização para avaliação de resposta	71
Quadro 5-1 - Parâmetros de operação utilizados na experimentação de resposta.....	83
Quadro 5-2 - Parâmetros de retificação para texturização com perfil senoidal - análise de profundidade.....	85
Quadro 5-3 - Parâmetros de texturização para avaliação de resposta - microrampa.....	96
Quadro 5-4 - Parâmetros de operação para a texturização com 2 e 4 microampas (relação 1:9)	102
Quadro 5-5 - Parâmetros de operação para a texturização com 1 microrampa (relação 1:9).	107

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE QUADROS	xix
SUMÁRIO.....	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Diagnóstico e Motivação	3
1.3 Questão de pesquisa e objetivos	6
1.4 Descrição do trabalho	7
2 REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 Processos de fabricação de superfícies	9
2.2 Processos de fabricação de texturas para aprimoramento de mancais.....	15
2.3 Processos de fabricação de texturas por retificação.....	16
3 METODOLOGIA PARA A APLICAÇÃO DA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS NA FUNCCIONALIZAÇÃO SUPERFICIAL DE MANCAIS DE VIRABREQUINS.....	29
3.1 Restrições.....	29
3.1.1 Requisitos de Atuação (precisão de posicionamento e velocidade de resposta) 29	
3.1.2 Requisitos da Textura (controle de perfil e rugosidade).....	33
3.1.3 Requisitos do Processo (custo, produtividade e flexibilidade).....	36
3.2 Metodologia para Texturização com Processo de Retificação	38
4 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TEXTURIZAÇÃO COM RETIFICAÇÃO	47
4.1 Projeto do dressador dinâmico.....	47
4.2 Desenvolvimento do sistema contínuo de dressagem.....	52
4.3 Modelagem do perfil microrampa para aprimoramento de mancais	59
4.4 Sistema para simulação do processo de texturização com retificação.....	62

4.5	Testes preliminares.....	68
5	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO.....	75
5.1	Materiais, equipamentos e condições gerais dos testes experimentais	76
5.2	Validação experimental das restrições da texturização e simulador	83
5.3	Avaliação experimental da texturização de microrampas com o processo de retificação 100	
6	CONCLUSÕES	113
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
	Anexo – Artigos publicados no <i>annals of cirp</i>	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Atribui-se atualmente à frota mundial de veículos 22% do volume de emissões de gases de efeito estufa e poluentes na atmosfera. O potencial poluidor dos veículos atinge proporções não sustentáveis e os panoramas de crescimento mundial apontam a necessidade de tomar medidas para reverter este processo (ATABANI et al., 2011).

A indústria automotiva tem sido pressionada a desenvolver tecnologias com o objetivo de tornar o setor mais sustentável. As soluções propostas buscam reduzir o consumo de combustível e a consequente diminuição da emissão de poluentes. Estas tecnologias podem ser classificadas em três grandes grupos: combustíveis alternativos; desenvolvimento de projetos mais robustos em motores a combustão interna; e eletrificação (REAL et al., 2009).

Os combustíveis alternativos representam formas de conversão de energia mais eficientes e/ou maneiras aprimoradas para reduzir o balanço de gases e toxinas em seus ciclos de vida. Representam alto potencial para redução das emissões de CO₂. Entretanto, ainda possuem barreiras tecnológicas para tornar viável sua aplicação. O maior exemplo é o hidrogênio (ROMM, 2006).

A eletrificação possibilita a diminuição ou eliminação do uso da combustão interna, como forma de geração de propulsão nos veículos. Neste caminho, as opções em desenvolvimento buscam desde a total eletrificação dos automóveis até a combinação de propulsão elétrica e combustão interna (híbridos). As opções híbridas visam solucionar o principal problema da eletrificação, o armazenamento de energia suficiente nas baterias para as necessárias autonomias de uso. Similar aos combustíveis alternativos, a eletrificação também necessita de pontos especiais para recarga dos veículos, além de investimentos na matriz elétrica para comportar essa nova demanda. O custo associado à infraestrutura e o limite tecnológico atual das baterias, ainda em desenvolvimento, representam as principais barreiras limitadoras a expansão da eletrificação (BROWN; PYKE; STEENHOF, 2010).

A otimização dos motores a combustão interna, a curto prazo, é ainda a opção financeiramente mais viável para redução do consumo de combustíveis e, como consequência, redução das emissões. Tecnologias para tornar os motores mais eficientes no seu ciclo de combustão, redução da perda energética com atrito dos componentes móveis e sistemas de

transmissão aprimorados são exemplos destas opções. Elas apresentam alto potencial de uso devido à redução de emissões com o menor custo financeiro de implantação e por serem mais facilmente apoiadas pela atual infraestrutura de produção e cadeia de fornecimento automotiva.

Estima-se que uma representativa redução no consumo de combustíveis pode ser obtida com o aprimoramento da lubrificação nas partes móveis dos motores a combustão interna. A porção de energia perdida em um veículo leve, considerando somente o motor, pode chegar a 48%, sendo atrito a maior parcela desta (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012). Aprimoramentos relacionados diretamente com a lubrificação interna dos motores comprovam que uma economia de combustível de até 5%, com relativo baixo investimento e alto potencial de retorno, pode ser atingida com redução das perdas com atrito (ATABANI et al., 2011).

O virabrequim é o componente típico de um motor que possui maior impacto nas perdas energéticas. Ele é responsável por absorver os esforços resultantes da combustão interna e transmitir o movimento ao *powertrain* veicular. A lubrificação fornece aos mancais a sustentação hidrodinâmica necessária para a operação nas diversas rotações, sem que ocorra contato direto entre as superfícies. O efeito hidrodinâmico ocorre pela aplicação de filme lubrificante nos mancais para que, durante o movimento relativo, ocorra pressão de sustentação e assim eixo e mancal não entrem em contato. O desempenho dos mancais está diretamente associado a este efeito hidrodinâmico. Aprimorar as propriedades reológicas da superfície de contato permite maior resistência do filme lubrificante às cargas de operação e menores perdas energéticas por atrito. Tais efeitos são diretamente associados ao desempenho e eficiência do motor a combustão interna.

O aprimoramento do efeito hidrodinâmico pode ser obtido com a adição de texturas superficiais. A dinâmica de entrada e saída do fluido nestas texturas micrométricas acarreta os efeitos de otimização desejados na região de alta tensão dos mancais. Tal funcionalização da superfície pode ser atingida com a fabricação de formas esféricas ou canais, por exemplo. As calotas esféricas adicionam a funcionalização no sentido de atuarem como microalojamentos de fluido, que auxiliam na lubrificação em baixa pressão e no aprisionamento de detritos (BUSCAGLIA; CIUPERCA; JAI, 2007; PETTERSSON; JACOBSON, 2007; NANBU et al., 2008). Os canais acrescentam a capacidade de direcionar o fluido às regiões com maiores pressões, efeito que aumenta estabilidade dos mancais em operação além de aumento da capacidade de carga.

O fabricante de peças automotivas Thyssenkrupp desenvolveu uma opção de superfície funcional para possibilitar a melhoria específica de desempenho hidrodinâmico em mancais de virabrequins. As microrampas, assim denominadas, permitem maior capacidade de carga do mancal, melhor fluxo de óleo na direção axial e redução das perdas viscosas. Este resultado está associado ao “efeito de cunha” criado por estas inscrições. As microrampas possuem geometria assimétrica, formada por duas curvas com comprimentos distintos que desenham uma cunha. Durante o rolamento do eixo no mancal, o fluido é progressivamente pressurizado dentro da curva maior da microrampa até seu esmagamento na cunha de saída (curva menor). Este efeito proporciona melhor dinâmica do lubrificante durante operação, com maior estabilidade do filme e redução da força de atrito (SALLES; CARDOSO; DUARTE, 2015). Para visualização das microrampas, a Figura 1-1 ilustra a forma desenvolvida pelo fabricante.

Figura 1-1 - Superfície funcional tipo microrampa desenvolvida pela Thyssenkrupp

Fonte: (SALLES; CARDOSO; DUARTE, 2015), adaptado pelo autor.

No presente trabalho é proposto um sistema para viabilizar a funcionalização de superfícies de mancais de virabrequins com as microrampas.

1.2 Diagnóstico e Motivação

As vantagens operacionais atreladas à funcionalização nas superfícies de mancais hidrodinâmicos motivam o desenvolvimento de soluções nesta área. Entretanto, a proposição destas inscrições ainda se baseia em modelos simplificados e experimentação comparativa. O complexo comportamento do lubrificante neste regime especial requer modelos numéricos

específicos que estão em desenvolvimento (BUSCAGLIA; CIUPERCA; JAI, 2007; KANGO; SINGH; SHARMA, 2012).

A fabricação destas superfícies especiais possui também alta complexidade de execução. As inscrições requerem alta precisão geométrica e dimensional para assegurar que os resultados obtidos sejam representativos. Adicionalmente, a fabricação deve ser capaz de produzir as texturas nas condições desejadas sem que as já restritas tolerâncias dos mancais sejam afetadas. A soma destes desafios limita a poucos os processos de manufatura aptos a atender tal fabricação com qualidade, custo e produtividade. Os principais processos empregados atualmente são: *etching*, *laser* e usinagem.

O processo de fabricação *etching* remove material da superfície por degradação química. Este processo lento possui característica de produzir inscrições com alta precisão dimensional e acabamento, sendo já empregado em alguns estudos de funcionalização de superfícies. Entretanto, o processo necessita de ferramentais específicos, possui baixa produtividade e comparativo alto custo operacional. Seu custo para aplicação em produção de peças em alta escala representa a principal barreira limitante (COSTA; HUTCHINGS, 2007, 2009; BRUZZONE; COSTA, 2013).

A texturização com aplicação de pulsos *laser* possui desempenho de fabricação similar ao *etching*. O feixe de alta intensidade também se caracteriza pelo elevado grau de precisão para a remoção de parcelas micrométricas de material da superfície. O processo de remoção com *laser* também já é aplicado para produção de alguns tipos de texturas para a funcionalização. As formas esféricas são geometrias normalmente inscritas à *laser* (ETSION, 2005, 2013b). Entretanto, a formação dos cavacos por sublimação cria imperfeições nas bordas destas inscrições que, após a texturização, devem ser removidas para obtenção do acabamento requisitado em mancais. Outra característica é que o *laser* é um processo de fabricação não tipicamente empregado na produção de mancais. Dessa forma, uma etapa adicional necessitaria ser inserida nas linhas de fabricação. Estes custos associados, e também a baixa produtividade, tornam o *laser* uma opção não viável para alta produção.

A usinagem representa uma boa opção para atender aos requisitos desejados de um processo industrial de texturização. É um processo de fabricação já empregado na produção de virabrequins e que atende tradicionalmente aos restritos aspectos de produtividade da indústria

metal-mecânica. Os processos de usinagem tipicamente aplicados na fabricação de superfícies de mancais são: fresamento, torneamento e retificação.

A fabricação com geometria definida (torneamento e fresamento) possui limitação funcional relacionada com a dimensão da aresta de corte. A alta complexidade para proporcionar a formação de cavaco com arestas de corte em escala micrométrica dificulta a aplicação de torneamento e fresamento na texturização. Os trabalhos desenvolvidos com geometria definida possibilitaram a funcionalização para aplicação em casos distintos aos mancais (DENKANA et al., 2008; DENKANA; BOEHNKE; KÄSTNER, 2008; LI et al., 2017).

A aplicação de usinagem com geometria não definida (retificação) complementa as opções. Neste processo a formação do cavaco é resultante do contato com micro-arestas de corte, o que possibilita controle preciso na escala necessária. Entretanto, o processo apresenta alta complexidade para controle preciso destas arestas de corte.

A metodologia desenvolvida por Oliveira; Bottene e França, (2010) e Bottene, (2012), apresentou uma proposta para aplicação da retificação como ferramenta de texturização. No método os pesquisadores demonstraram a capacidade de se controlar apenas parâmetros operacionais, inerentes ao processo, como forma de inserir texturas em peças retificadas. Denominada “texturização de rebolos”, a estratégia não necessita de um processo adicional para texturização, apenas inclusão de um sistema controlado para inscrição das texturas na ferramenta de corte (rebolo) durante sua preparação (dressagem). Os resultados apresentados pelos trabalhos dos pesquisadores avaliaram a funcionalidade deste método com retificação cilíndrica de mergulho para texturização da peça. A comparação de qualidade superficial e tolerância geométrica das peças retificadas, com e sem textura, comprovaram que a metodologia assegura a precisão necessária para aplicações industriais.

Os resultados prévios da estratégia de “texturização de rebolos” e a comparação com os outros processos encontrados na revisão da literatura sobre texturização com retificação (Capítulo 2), comprovam o alto potencial para a aplicação do método. Entretanto, o processo ainda não foi avaliado para reprodução de texturas específicas para fins de aprimoramento de mancais hidrodinâmicos. Estas texturas necessitam de elevado controle geométrico e superficial para que os resultados sejam atingidos. A falta de solução para atender esta potencial oportunidade motivou o desenvolvimento deste trabalho.

1.3 Questão de pesquisa e objetivos

Os apontamentos apresentados nas seções anteriores sobre o impacto positivo de se aprimorar a lubrificação nos motores a combustão interna, sustentam a busca de soluções tecnológicas de manufatura que possibilitem a fabricação destas superfícies customizadas. Todavia, não há proposição de um sistema robusto que seja capaz de atender tal demanda dentro da uma escala industrial do atual setor automobilístico mundial. Em especial, não há ainda um processo que permita fabricar as microrampas para o aprimoramento funcional do virabrequim e possibilite a consequente redução representativa do consumo de combustível e emissões de gases poluentes.

O objetivo da tese é capacitar a metodologia de Oliveira; Bottene e França, (2010), e Bottene, (2012), para produção de microrampas na superfície de mancais de virabrequins durante o processo de retificação. A técnica de “texturização de rebolos” possui potencial para atender esta proposição, mas ainda não há os mecanismos de execução necessários para sua aplicação em ambientes de produção. A elaboração de um sistema capaz de conduzir esta avaliação é de interesse do parceiro a patrocinador deste trabalho de pesquisa, o grupo *Forging & Machining* da Thyssenkrupp, localizado na planta de Campo Limpo Paulista, São Paulo.

O objetivo inédito do trabalho é de desenvolver um sistema robusto que utilize a texturização de rebolos para a produção de microrampas durante a retificação por mergulho dos munhões e moentes de virabrequins. Este sistema deve atender as seguintes características:

- Possibilitar a produção de microrampas com controle do perfil geométrico desejado e profundidades na faixa de 5 a 24 μ m;
- Possuir baixo custo de aquisição e operação, sendo possível instalação em retificadoras CNC típicas da indústria automotiva;
- Não comprometer a produtividade e qualidade já associadas à retificação, não alterar representativamente os restritos tempos de fabricação em linhas de produção;
- Ser um sistema de planejamento e execução da texturização, composto por:
 - **Sistema para design das texturas:** capaz de, a partir da parametrização de projeto desejada na superfície da peça,

determinar as condições de dressagem a serem utilizadas na retífica;

- **Sistema de simulação:** software para avaliação dos limites do processo de texturização de rebolos para predição do resultado e retroalimentação do projeto;
- **Sistema de atuação e controle:** plataforma para comando do dressador dinâmico e respectivo sincronismo com o processo;
- **Processo de retificação com texturização:** parametrização para remoção do sobremetal com inscrição dos perfis na superfície da peça.

1.4 Descrição do trabalho

Nas seções seguintes estão representadas as etapas realizadas para atender o objetivo proposto. O embasamento teórico necessário é coberto pela revisão bibliográfica (Capítulo 2) e pela experiência de trabalhos prévios desenvolvidos pelo grupo de pesquisa em superfícies funcionais do LAPRAS (Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade) da EESC-USP (Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo). A metodologia desenvolvida para aplicação da texturização de rebolos na funcionalização superficial de mancais de virabrequins está descrita no Capítulo 3. Neste capítulo as condições atreladas aos requisitos do sistema estão detalhadas em três grupos: atuação, textura e processo de fabricação.

O desenvolvimento do sistema para execução da metodologia proposta está descrito no Capítulo 4. O dressador dinâmico e a aplicação para seu controle posicional representam o sistema de atuação e controle. Este é responsável pela inscrição das texturas na periferia do rebolo que proporcionarão a funcionalização da superfície do mancal retificado. Este sistema é baseado no proposto por Oliveira; Bottene e França, (2010) e Bottene, (2012), porém possui maior precisão posicional e velocidade de resposta de forma a realizar as interpolações do perfil das microrampas. O projeto do dressador e os testes realizados para seu desenvolvimento estão apresentados no Capítulo 4. Adicionalmente, o sistema de modelagem e simulação das texturas também está descrito neste capítulo. Estes sistemas integram a cadeia proposta de dispositivos para criação precisa das microrampas.

A avaliação experimental do sistema é descrita e discutida no Capítulo 5. Os testes avaliaram a capacidade do sistema em integrar o projeto, simulação e usinagem das texturas. Os resultados são avaliados pelas medições de perfil e circularidade das peças após a retificação de mergulho. A avaliação de desempenho das microrampas em mancais não pertence ao escopo de desenvolvimento do sistema proposto.

Por fim, as conclusões deste trabalho e as proposições de futuros desenvolvimentos estão descritas no Capítulo 6.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processos de fabricação de superfícies

Evans e Bryan (1999) estabeleceram que as superfícies estruturadas (*structured surfaces*) são inscrições especialmente desenvolvidas para adicionar à superfície algum atributo funcional. Os autores também classificam a engenharia de superfície (*engineered surfaces*) como técnica de manufatura especialmente desenvolvida para geração de variações de geometria numa superfície para um desempenho funcional específico (EVANS; BRYAN, 1999). Esta classificação também é apresentada por Bruzzone et al., (2008), que em seu trabalho contextualiza as novas tecnologias de engenharia de superfície segundo suas aplicações. A classificação de aplicação proposta pelos autores é dividida em três principais grupos de propriedades funcionais: físicas, biológicas e tecnológicas (BRUZZONE et al., 2008). Estes dois trabalhos apresentaram uma revisão das possíveis aplicações, métodos de fabricação e estratégias de metrologia associados ao tema de funcionalização de superfícies.

Em estudo mais recente na área de superfícies funcionais, o tema é trazido a discussão devido crescimento de publicações nesta área. Em revisão das tendências desse assunto nos principais periódicos associados ao tema, Gropper; Wang; Harvey (2016) destacam a importância acadêmica dos primeiros trabalhos publicados, atribuídos ao grupo de pesquisa de Etsion, (2013). A tendência de crescimento dessa área está representada no gráfico histórico dos trabalhos, ilustrado na Figura 2-1. O caráter inovador das aplicações na área de texturização de superfícies também foi avaliado neste levantamento, ao observar o grande número de trabalhos que ainda são apenas teóricos (55% do total encontrados). O domínio dos métodos de pesquisa também está representado na Figura 2-1.

Figura 2-1 - Número de pesquisas no mundo sobre o tema texturização de superfícies

Fonte: (GROPPER; WANG; HARVEY, 2016), adaptado pelo autor.

O crescente número de artigos nesta área também está associado à gama de aplicações que a funcionalização de superfícies procura atender. Os principais trabalhos de revisão do estado da arte neste tema apresentam a variabilidade de aplicações em desenvolvimento (EVANS; BRYAN, 1999; BRUZZONE et al., 2008; FANG et al., 2013; COBLAS et al., 2015; ABDEL-AAL, 2016; GROPPER; WANG; HARVEY, 2016; HASHIMOTO; CHAUDHARI; MELKOTE, 2016).

Coblas et al. (2015) resumizam em seu artigo de estado da arte as aplicações segundo o domínio, função atrelada e exemplos baseado nos artigos levantados. Esta revisão está representada no Quadro 2-1 para discussão sobre o tema. A mesma avaliação foi feita por Moronuki, (2016), obtendo resultados similares. Entretanto, seu estudo teve foco nos trabalhos desenvolvidos com texturizações inspiradas em superfícies biomimetizadas. O autor descreve os resultados de trabalhos que reproduziram com processos industriais as superfícies naturais que atendem às funções desejadas.

Quadro 2-1 - Relação de trabalhos na área de engenharia de superfícies e suas aplicações

Domínio	Função	Aplicações
Ótica	Reflexão, difração, polarização, absorção de luz, filtro	Lentes Fresnel, sinalização reflexiva, filtros de luz, espelhos específicos
Acústica	Redução de ruído e vibração	Discos de freio
Energia de superfícies	Capilaridade, adesão, molhabilidade	Super-higrofobia, super-olefobia, superfícies auto-limpantes, adesão de tintas, adesão de superfícies, separação de óleo/água, superfície anti-adesão
Mecânica	Aumento de resistência a fadiga e dureza, aumento de vida	Disco rígido, fixação a vácuo, máquinas para processos abrasivos (para corte, polimento e marcação)
Lubrificação	Micro-mancais, aprisionamento de partículas suspensas, armazenamento de lubrificante, redução de atrito e adesão, melhoria de resistência ao desgaste, formação de tribo-filmes	Mancais axiais, mancais radiais, selos mecânicos e selos dinâmicos
Hidrodinâmica	Redução de arraste, nucleação de bolhas	Microfluídica (difusão, controle de fluido), cravos de pneus, bolas de golf
Bioengenharia	Promover ou inibir absorção, adesão ou crescimento celular	Cultura de células, bio-MEMS, implantes, adesão química.
Termodinâmica	Transferência de calor	Mecanismos spray

Fonte: (COBLAS et al., 2015), adaptado pelo autor.

Os processos de fabricação empregados na produção destas estruturas são classificados em quatro principais grupos. Tal divisão foi proposta inicialmente no trabalho de revisão apresentado por Evans e Bryan, (1999), sendo a mesma metodologia adotada pelos outros

trabalhos levantados. Segundo esta metodologia, os processos de fabricação podem ser classificados como:

- Adição de material;
- Remoção de material;
- Formação por replicação;
- Modificação da estrutura superficial do material (EVANS; BRYAN, 1999).

Em recente publicação sobre os avanços nesta área, Abdel-Aal (2016) destaca os principais métodos utilizados na fabricação e apresentados em trabalhos avaliados. O resultado desta compilação está descrito no Quadro 2-2, apenas para os processos de remoção de material. Foram mantidos os nomes originais dos processos para pesquisa nas bases de dados.

Quadro 2-2 - Processos de fabricação para texturização superficial com remoção de material

Macro classificação	Métodos	Processos
Alta temperatura	Laser	<i>Laser surface texturing (LST), masked excimer laser, CNC focused lasers, femto-second lasers.</i>
	Usinagem por descargas elétricas (EDM)	<i>Electrical discharge texturing (EDT), micro EDM.</i>
	<i>Ion beam texturing (IBT)</i>	
Química (etching)	Métodos com uso de máscara	<i>Chemical texturing, electrochemical texturing.</i>
	Métodos sem necessidade de máscara	<i>Self-assembling, maskless electrochemical texturing, anisotropic etching.</i>
Mecânico	Usinagem CNC ultrassônica	
	Brunimento	
	Retificação	
	Jatos abrasivos	
	Micro usinagem	
	Erosão com máscara	

Fonte: (ABDEL-AAL, 2016), adaptado pelo autor.

O destaque para os processos por remoção de material é dado devida à sua relevância, quando se objetiva produtividade e qualidade na fabricação. Segundo a análise qualitativa proposta por Coblas et al. (2015), estes processos apresentam a melhor combinação para controle de características de qualidade (rugosidade e dimensão), custo benefício e produtividade. A mesma análise é discutida por Fang et al. (2013), em relação à capacidade das novas tecnologias de usinagem para a inclusão das texturas na superfície.

Entretanto, a seleção do processo de fabricação está bastante atrelada à aplicação desejada para a funcionalização das superfícies. Os trabalhos citados detalham as características qualitativas empregadas nas aplicações, sendo os principais fatores de seleção a precisão e as limitações geométricas/dimensionais (BRUZZONE et al., 2008; ABDEL-AAL, 2016; MORONUKI, 2016).

A funcionalização de superfícies para a aplicações tribológicas é qualificada segundo restrições particulares de forma e qualidade das texturas (GROPPER; WANG; HARVEY, 2016). Os trabalhos nesta área foram iniciados pelas publicações dos resultados potenciais encontrados por Etsion em suas primeiras pesquisas, sumarizados em sua publicação de 2013 (ETSION, 2013a). Ele experimentou parâmetros determinísticos associados à inclusão de perfis em superfície funcional sob condição de lubrificação para redução de atrito e desgaste. O resultado possibilitou a discussão sobre os critérios de design das texturas para obter os melhores desempenhos para a aplicação (ETSION, 2013a). Esta avaliação também foi conduzida por Bruzzone e Costa (2017), porém com a particular associação entre as formas externas e sua distribuição e o desempenho das superfícies. As formas avaliadas foram baseadas em perfis para armazenamento do lubrificante e aprisionamento de partículas suspensas, condições típicas para redução dos esforços de atrito. Os perfis esféricos (*dimples*) e assimétricos (ponta de flexa – *chevron* e elíptico) são as geometrias que melhor apresentam estes resultados (ETSION, 2013a; ABDEL-AAL, 2016; GROPPER; WANG; HARVEY, 2016; GACHOT et al., 2017).

Nanbu et al. (2008) descrevem a função complementar que o perfil interno das texturas proporciona. Em seu trabalho, os resultados prévios na área foram utilizados como referência para a adaptação dos modelos clássicos de mecânica dos fluidos. Os modelos desenvolvidos foram utilizados para simulação numérica do efeito hidrodinâmico dos perfis segundo as

características operacionais propostas, em especial, o aprimoramento do desempenho quando aplicados em condições hidrodinâmicas. Um aumento considerável na capacidade de sustentação e espessura do filme lubrificante foi observado quando comparado à forma típica esférica. Este resultado está ilustrado na Figura 2-2. A mesma análise foi obtida na revisão dos trabalhos tribológicos conduzida por Gropper; Wang e Harvey (2016) com ênfase particular na necessidade de modelos computacionais robustos para análise dos efeitos e aprimoramento das texturas.

Figura 2-2 - Desempenho hidrodinâmico de perfis internos

Fonte: (NANBU et al., 2008), adaptado pelo autor.

Trabalhos de pesquisa na área de mancais complementam o papel desse atributo geométrico com a validação experimental da influência da qualidade superficial no desempenho tribológico obtido. As discussões e análises concluem que a funcionalização das superfícies deve adicionar os efeitos hidrodinâmicos, desde que sem induzir aumento da rugosidade, inclusão de arestas e rebarbas nas periferias das texturas (ETSION, 2013b; VLĂDESCU et al., 2016; BHADURI et al., 2017).

O potencial de aplicação da funcionalização de superfícies foi observado pelo grupo de pesquisa e desenvolvimento da Empresa *ThyssenKrupp*, em busca de aprimoramento funcional dos mancais hidrodinâmicos presentes nos motores à combustão. Os pesquisadores propuseram a inovação tecnológica associada à produção de micro cavidades em virabrequins segundo as restrições de perfil e rugosidade. Um modelo de cavidade foi dimensionado para redução do atrito e aumento do esforço de sustentação quando em operação. Os detalhes técnicos estão discutidos na patente depositada US 2015/0204377 A1 (SALLES; CARDOSO; DUARTE, 2015).

A maior limitação tecnológica apontada nas revisões de Nanbu et al. (2008) e Abdel-Aal. (2016) e Gropper; Wang; Harvey. (2016) está na fabricação robusta destas superfícies para aprimoramento de mancais. Na seção 2.2 os principais métodos de fabricação estão discutidos e suas limitações apontadas.

2.2 Processos de fabricação de texturas para aprimoramento de mancais

A fabricação de texturas para a funcionalização de superfícies pode ser realizada pelos principais processos apresentados por Evans e Bryan (1999) e Bruzzone et al. (2008) – descritos na seção 2.1, entretanto a revisão mais específica para aplicação em mancais aponta a remoção de material como principal opção (HASHIMOTO; CHAUDHARI; MELKOTE, 2016).

As restrições levantadas de geometria interna dos perfis e controle dimensional compreendem os principais fatores de seleção nestes processos. Isto pode ser evidenciado também pelos principais artigos publicados nesta área, sendo os processos de laser, *etching* e usinagem as referências adotadas com maior frequência para condução de trabalhos experimentais (ABDEL-AAL, 2016; GROPPER; WANG; HARVEY, 2016).

O laser representa a opção com maior número de trabalhos citados para a produção das inscrições esféricas (*dimples*). A alta concentração de energia capaz de ser produzida pelo feixe e suas propriedades espaciais proporcionam a inscrição precisa desse tipo de forma, com dimensões de 10 μ m a 1mm de diâmetro e profundidade de até 500 μ m (BORGHI et al., 2008; VLĂDESCU et al., 2016; BHADURI et al., 2017). Entretanto, o alto custo operacional do processo e a típica necessidade de pós-tratamento da superfície representam os principais fatores que motivam o uso experimental e atrelado somente a esta geometria de textura (COBLAS et al., 2015).

O processamento por *etching* – remoção química, representa a principal solução quando se objetiva a produção de perfis customizados de texturas (COSTA; HUTCHINGS, 2007, 2009; BYUN et al., 2010; BRUZZONE; COSTA, 2013; CHEN et al., 2015). Este processo utiliza a combinação entre a corrosão química e o movimento mecânico para projeção perpendicular do perfil a peça. Os avanços nesta área procuram tornar o processo mais produtivo, com novas técnicas para inclusão sem necessidade de máscara para a projeção do perfil. Entretanto, assim

como o laser, para aplicações industriais, apresenta baixa produtividade e alto custo (COBLAS et al., 2015).

A usinagem, apesar de tão tradicional, é o processo de fabricação mais recentemente pesquisado para a funcionalização de superfícies. Os avanços relacionados com a produção de ferramentas de corte com arestas na escala dimensional das texturas representa o principal fator para uso recente deste método (COBLAS et al., 2015). A estratégia para texturização com ferramenta de corte consiste na combinação dos movimentos típicos das máquinas ferramentas com eixo adicional para resposta a altas velocidades. Esta estratégia é conduzida nos processos de usinagem com vibração induzida, encontrados na literatura como: *fast-servo assisted*, *elliptical vibration texturing*, *ultrasonic machining* e *fast servo assisted* (DENKINA et al., 2008; GRAHAM; PARK; PARK, 2013; GUO et al., 2014; GANDHI et al., 2016; KIM; LEE, 2016; KURNIAWAN; KISWANTO; KO, 2016; LI et al., 2017; XU et al., 2017).

Os processos de usinagem com geometria indefinida completam as opções para reprodução de texturas em peças. As características particulares da remoção de material destes processos representa a principal motivação para adoção deste método, devido a eficiência na escala dimensional das texturas (COBLAS et al., 2015). Esta estratégia é adotada devida a relação já direta entre os processos abrasivos e a qualidade superficial obtida (HASHIMOTO; CHAUDHARI; MELKOTE, 2016).

Entretanto, nas referências citadas, os métodos desenvolvidos e/ou utilizados tiveram o objetivo principal a inscrição da textura em si, não sendo contemplada a avaliação do perfil interno resultante. Assim, nas pesquisas desenvolvidas até o presente momento, as características desejadas das texturas usinadas por processos abrasivos para aplicação em mancais não são completamente atendidas.

2.3 Processos de fabricação de texturas por retificação

O processo de texturização com retificação não representa um assunto novo nas pesquisas. O contato entre a ferramenta de corte e a peça é realizado com geometria de corte indefinida, sendo o controle topográfico do rebolo a principal estratégia para obter os resultados de qualidade superficial desejados. Esta estratégia foi proposta por Oliveira (1988), onde o efeito das inscrições introduzidas na superfície da ferramenta de corte (rebolo) pelo processo

de afiação e preparação (dressagem) foi analisado. Este macroefeito, assim denominado, é induzido devida a cinemática de deslocamento do dressador ao longo da superfície do rebolo. Característica observada por Stepién (1989) para a proposição de sua metodologia para texturização com retificação (STEPIÉN; SZAFARCZYK, 1989).

O método de texturização proposto nesses casos utiliza o macroefeito da dressagem para inclusão de marcações helicoidais na superfície do rebolo, entretanto, com valores de profundidade (a_d) e velocidade (v_d) superiores aos adotados para a dressagem típica (STEPIÉN; SZAFARCZYK, 1989). O resultado é o perfilhamento da superfície do rebolo, similar ao roscamento externo durante a operação de torneamento. A Figura 2-3 ilustra a seção transversal do rebolo com superfície especialmente produzida com este método.

A texturização ocorre ao combinar a velocidade de avanço (v_f) com a velocidade de rotação do rebolo (n_s) durante a retificação. Particularmente para a estratégia adotada, a retificação ocorre em passe único com profundidade de corte (h) inferior a profundidade das marcações helicoidais inscritas no rebolo (H). Esta estratégia foi modelada e as dimensões capazes de serem reproduzidas foram apontadas. A Figura 2-4 ilustra esta metodologia de texturização, bem como as formas que puderam ser reproduzidas pelos trabalhos do pesquisador. A limitação deste método está associada a estratégia de contato adotada, sendo capaz de reproduzir apenas alguns exemplos de texturas e não possibilitar contato completo do rebolo com a peça.

Figura 2-3 - Seção transversal de rebolo com perfil helicoidal

Fonte: (STEPIÉN; SZAFARCZYK, 1989).

Figura 2-4 - Metodologia de texturização com rebolo perfilado

Fonte: (STEPIÉN; SZAFARCZYK, 1989), adaptado pelo autor.

A mesma estratégia para produção de texturas foi adotada no trabalho desenvolvido por Denkena; Köhler e Wang (2010). Os autores propuseram um perfil de textura, bioinspirado na pele de tubarões, para aprimoramento do desempenho superficial de peças sujeitas a esforços aerodinâmicos, caso particular de pás de turbinas a gás. Este perfil foi denominado *riblet*. A texturização da peça também ocorre após perfilamento do rebolo, entretanto o perfil é introduzido no rebolo por reprodução, não sendo utilizados os movimentos de dressagem na construção das formas. Assim, é necessário a construção de dressador rotativo específico com o perfil para que este seja incluso no rebolo durante a texturização. A funcionalidade está representada da ilustração do trabalho descrita na Figura 2-5.

Figura 2-5 - Texturização com rebolo perfilado por dressador rotativo perfilado

Fonte: (DENKENA; KÖHLER; WANG, 2010), adaptado pelo autor.

Complementar a estes métodos, a retificação de ultra-precisão proporciona que texturas possam ser produzidas ao utilizar rebolos especiais. As ferramentas abrasivas usadas nestes processos possuem alta precisão dimensional dos grãos abrasivos, quando comparadas às ferramentas comumente utilizadas, objetivando arestas de contato ultra-precisas para corte em condições micrométricas (BRINKSMEIER et al., 2010). Particularmente, dois processos foram desenvolvidos para texturização de superfícies.

Aurich et al. (2009) avaliaram a capacidade de inscrição de texturas micrométricas em materiais frágeis com uso de micro rebolos especialmente desenvolvidos. Foram produzidos três modelos de rebolos para avaliação das inscrições reproduzidas em cerâmicas e carbonetos. Os modelos de rebolos produzidos e o resultado obtido após retificação em micro Retificação estão representados na Figura 2-6.

Figura 2-6 - Texturização com rebolo de ultra precisão para microtexturas em materiais frágeis

Fonte: (AURICH et al., 2009), adaptado pelo autor.

Em escala macroscópica, a mesma estratégia de ultra precisão foi adotada pelo pesquisador para texturização com rebolo produzido com dispersão padronizada de grãos. Silva et al. (2017) utilizaram rebolo produzido com posicionamento de grãos definido para combinar os movimentos da retificação e induzir marcações durante a retificação plana. A seleção dos grãos e o posicionamento foi previamente definido de forma a possibilitar contato sem sobreposição das trajetórias durante o corte. Similar a Stepién e Szafarczyk, (1989), foi elaborado modelo preditivo para combinar a velocidade angular do rebolo (n_s) com a velocidade de deslocamento da peça (v_w) e reproduzir formas distintas de texturas. Como resultado, trajetórias circulares foram modeladas para determinar, em simulador, o contato ao longo do deslocamento de corte. O método desenvolvido apresentou limitações quanto às formas que podem ser reproduzidas, além de requerer produção específica de rebolo para atender a cada aplicação. A metodologia adotada e os dispositivos estão descritos na Figura 2-7.

Figura 2-7 - Texturização com rebolo pré-fabricado com dispersão de grãos

Fonte: (SILVA et al., 2017), adaptado pelo autor.

O autor do presente trabalho juntamente com colegas (Oliveira; Bottene e França, (2010)), desenvolveu metodologia de texturização com processo de retificação baseado também no macroefeito da dressagem. Os autores utilizaram a experiência prévia no controle do processo de dressagem para proposição da metodologia de funcionalização de superfícies denominada “Texturização de Rebolos”. O método utiliza a estratégia de adicionar um eixo externo de alta velocidade para indução de vibração ao dressador durante a dressagem. A vibração é produzida baseada em padronização de excitação para descrever perfis modulados por onda senoidal. A excitação proporciona a alteração da profundidade de dressagem (a_d) de forma controlada e sincronizada com a posição angular do rebolo. Esta estratégia possibilita a funcionalidade de *fast servo assisted* (LI et al., 2017) ao dressador, adicionando a função de texturização da usinagem na superfície do rebolo. Este funcionamento está ilustrado na Figura 2-8.

A texturização da superfície da peça ocorre com a retificação com o rebolo previamente condicionado. Os autores desenvolveram a metodologia para aplicação na retificação cilíndrica de mergulho, resultando a transposição da textura do rebolo na peça, com mudanças de forma,

por conta da cinemática do contato ocorrido na retificação. A metodologia da texturização, segundo proposto por Oliveira; Bottene e França, (2010), está representada na Figura 2-9.

Figura 2-8 - Texturização do rebolo com uso de eixo rápido instalado junto ao dressador

Fonte: (BOTTENE, 2012), adaptado pelo autor.

Figura 2-9 - Metodologia para texturização de superfícies com texturização de rebolos

Fonte: (OLIVEIRA; BOTTENE; FRANÇA, 2010), adaptado pelo autor.

Também conforme proposto pelos outros trabalhos de texturização, a parametrização do processo foi estabelecida para controle e predição das formas inscritas. Bottene, (2012),

descreve em sua pesquisa as condições geométricas associadas ao método proposto. A combinação das velocidades angulares do rebolo (n_s) e da peça (n_w) representa a condição para assegurar a transcrição desejada das texturas do rebolo na peça. Estabelecida como relação R , a razão entre as velocidades deve ser sempre valor inteiro para que as texturas sejam sobrepostas a cada volta da peça. Os parâmetros de dressagem: velocidade de dressagem (v_d), velocidade angular do rebolo (n_s) e largura de dressagem b_d , são utilizados para mapeamento angular do rebolo no processo de texturização. A combinação destes fornece o modelo de processo utilizado pelo sistema de controle para a inclusão dos perfis senoidais no rebolo. Este processo está representado na Figura 2-10. As texturas produzidas com esta metodologia estão ilustradas na Figura 2-11.

Figura 2-10 - Metodologia de texturização baseada nos parâmetros da dressagem

Fonte: (BOTTENE, 2012), adaptado pelo autor.

Figura 2-11 - Texturas inscritas na peça após retificação cilíndrica com rebolo texturizado

Fonte: (OLIVEIRA; BOTTENE; FRANÇA, 2010), adaptado pelo autor.

As conclusões determinadas pelos autores apresentaram as limitações deste processo. As texturas puderam ser reproduzidas com somente variações de ondas senoidais, limitação essa imposta pelo dispositivo de atuação selecionado. O atuador teve impacto também na máxima profundidade obtida, limitada a $25\mu\text{m}$. Entretanto, a alteração necessária para produção das texturas não impactou o desempenho do processo de retificação em si, fator representativo quando comparado às outras metodologias de texturização com retífica.

Silva et al. (2013) desenvolveram a estratégia complementar ao processo de Texturização de Rebolos para capacitação do processo a atender restrições de qualidade superficial. Em seu trabalho, a texturização com retificação foi parametrizada para combinar o macroefeito topográfico das texturas ao microefeito de afiação da dressagem. Assim, os autores apresentaram as estratégias para controle de rugosidade nas superfícies internas e externas da textura. Função particularmente de interesse quando se objetiva a texturização para fins de aprimoramento de efeitos tribológicos. As estratégias avaliadas estão ilustradas na Figura 2-12. O perfil das texturas inscritas na peça foi medido em microscopia de interferência, o resultado também está representado na Figura 2-12.

Figura 2-12 - Estratégia para controle de rugosidade na texturização com retífica

Fonte: (SILVA et al., 2013), adaptado pelo autor.

Os resultados observados nas metodologias para texturização com processo de retificação comprovam a capacidade de o processo atender ao propósito da funcionalização de superfícies. Entretanto, a aplicação para fins tribológicos requer além dos requisitos já atendidos pelo processo, a capacidade de reprodução de perfis nas cavidades das texturas.

A avaliação da cinemática do processo de retificação possui como referência os trabalhos desenvolvidos por Malkin e publicados em seu livro (Malkin e GUO (Capítulo 3, 2008)). Entretanto, os estudos relacionados a esta cinemática tipicamente avaliam o contato dos grãos abrasivos para predição do processo de formação de cavaco, para o levantamento dos esforços e a predição da rugosidade.

Stępień (2009) apresenta modelagem complementar para avaliação das trajetórias dos grãos abrasivos quando dispersos em rebolo com a periferia texturizada. Em seu modelo, o autor baseia-se na parametrização de Malkin e GUO (Capítulo 3, 2008) para avaliação das superfícies inscritas. Sua constatação indica a relação das geometrias inscritas no rebolo com a rugosidade resultante nas texturas marcadas na peça. Seu modelo aponta para a relação entre os segmentos do rebolo e a peça, fator que altera a rugosidade ao longo da textura. A Figura 2-13 representa o modelo adotado.

Figura 2-13 - Modelo de contato com rebolo texturizado proposto por Stępień, (2009)

Fonte: (STĘPIEŃ, 2009), adaptado pelo autor.

A parametrização indica a diferença entre o perfil obtido na peça e o perfil inscrito no rebolo. As seções simuladas, quando comparadas às seções inscritas, descrevem formas e dimensões distintas. Esta análise foi conduzida pelo autor para análise do comportamento da rugosidade variável ao longo da textura, não para predição do perfil inscrito após a Retificação.

Kim e Ko, (2015) complementaram esta avaliação ao reproduzir o modelo de Stępień, (2009) na experimentação com variação das condições de dressagem para perfilamento do rebolo. Os autores propuseram um sistema computacional para alinhar o resultado obtido na peça com o projeto do perfilamento do rebolo. O sistema desenvolvido utiliza a relação entre as dimensões do rebolo e a peça e o modelo de contato para determinar a velocidade de dressagem (v_d) e a velocidade angular do rebolo (n_s) que deve ser usada no perfilamento. Desta forma, o perfil inscrito no rebolo pode ser adaptado para que o resultado após a retificação seja obtido segundo a predição. Como resultado, os pesquisadores puderam obter desvio de apenas 1,12% do modelo quando comparado aos resultados observados na superfície das peças. Este resultado está representado na Figura 2-14.

Figura 2-14 - Resultado de previsão da simulação de texturização proposto por Kim e Ko (2015)

Fonte: (KIM; KO, 2015), adaptado pelo autor.

A proposição de modelos previsíveis para o processo de texturização apontou a necessidade de pesquisa específica para alinhar o projeto à execução. Os perfis que são capazes de ser produzidos com a texturização com retificação somente serão possíveis de ser determinados quando um modelo robusto for proposto e avaliado. Este requisito representa a restrição de funcionalização ainda não possível de ser atrelada à retificação devido ao processo não estar capacitado para o controle da geometria interna das texturas. Esta constatação representa a motivação científica encontrada para proposição do presente trabalho.

3 METODOLOGIA PARA A APLICAÇÃO DA TEXTURIZAÇÃO DE REBOLOS NA FUNCIONALIZAÇÃO SUPERFICIAL DE MANCAIS DE VIRABREQUINS

O presente projeto de pesquisa consiste em duas principais etapas. Inicialmente o estado da arte em texturização foi revisado para levantamento das restrições operacionais encontradas nos trabalhos já desenvolvidos. Estes dados foram complementados com as particularidades do processo de retificação para assim determinar as restrições ao se propor um sistema de texturização por retificação. Após a compilação destes levantamentos, na segunda etapa, um sistema apto a atender estas restrições é apresentado. Este sistema é composto pelo método de texturização e os dispositivos e sistemas desenvolvidos para viabilizar a texturização para aprimoramento de mancais por processos de retificação.

Os trabalhos avaliados nesta primeira etapa estão descritos em detalhes no capítulo 2 – Revisão da Literatura. Os resultados destes trabalhos foram sistematizados segundo 3 principais grupos de restrições operacionais observados neste levantamento: requisitos de atuação, requisitos da textura e requisitos do processo de inscrição. Estes grupos representam as similaridades observadas nestes trabalhos prévios e compreendem os principais pontos de aprimoramento que foram abordados para composição da metodologia de texturização. Na próxima seção (3.1) estas características estão descritas em detalhes.

Por fim, ao final do presente capítulo, a metodologia proposta para o sistema de texturização é descrita. O desenvolvimento consiste em revisar o método de texturização frente às restrições para compor o novo diagrama funcional e suas etapas. Este processo está descrito na seção 3.2 deste capítulo.

3.1 Restrições

3.1.1 Requisitos de Atuação (precisão de posicionamento e velocidade de resposta)

Os requisitos de atuação compreendem as especificações que o dispositivo de movimentação deve atender. O dispositivo é o responsável por introduzir os movimentos necessários para a inscrição das texturas na superfície dos mancais.

A texturização de rebolo foi o método de inscrição selecionado para a aplicação desenvolvida. Neste método, a produção das texturas é feita em duas etapas: durante a dressagem o rebolo é texturizado e, em seguida, a superfície da peça é inscrita pelo rebolo, durante a retificação. O dressador executa a inclusão das texturas no rebolo, resultado da

alteração da profundidade de corte, com uso de um atuador para movimento radial. O atuador deve possibilitar o avanço sem comprometer a qualidade da dressagem e seu desempenho possui direta relação com a qualidade das texturas inscritas na peça após a retificação.

Os resultados observados no trabalho de Bottene (2012) descrevem as limitações experimentalmente observadas relacionadas entre o atuador e as texturas reproduzidas. O sistema foi desenvolvido com uso do transdutor eletromecânico para análises modais - *shaker*, dispositivo com limitações relacionadas a capacidade de resposta e precisão de posicionamento. A alta inércia do atuador restringiu a resposta a apenas baixas frequências, com limitação a perfis descritos por ondas senoidais. Outro fator limitante encontrado nas conclusões dos autores refere-se à amplitude máxima obtida durante a texturização. A fixação do atuador foi feita com uso de sistema flutuante, adequado para testes modais, porém com influência negativa sobre a amplitude do movimento radial. Esta estratégia ocasionou dispersão da maior parte da energia de atuação, gerando profundidades limitadas a apenas 5 a 6 μ m no rebolo.

As texturas para aplicação em mancais não são capazes de serem reproduzidas com estas limitações. A patente referência para aplicação em mancais descreve inscrições com profundidade de até 24 μ m, geometria interna com formas interpoladas, controle posicional (tolerância dimensional) e superficial (rugosidade e perfil). Características que demandam seleção específica de um atuador para esta classe de controle.

O deslocamento máximo do atuador está limitado à energia que é possível ser entregue, solicitação dependente da frequência induzida. Na texturização, o avanço radial do dressador é limitado a frações do tempo de cada volta do rebolo, que nos experimentos conduzidos por Oliveira; Bottene e França, (2010) e Bottene, (2012), foram determinadas em cerca de 30ms. Ou seja, a movimentação necessária para descrever o perfil da textura com a amplitude de 24 μ m em frações de tempo de uma volta do rebolo limita a escolha de atuadores àqueles com características particulares de resposta a frequências superiores (quando comparados aos sistemas existentes no mercado). No caso particular das microrampas, o perfil de textura requer acelerações ainda superiores para ser capaz de produzir as inclinações desejadas segundo trajetória linear e com a precisão de posicionamento na escala micrométrica.

Para a análise desta restrição de resposta, o movimento necessário para inscrição das texturas está descrito na Figura 3-1. O perfil de textura está representado no plano XY, sendo a amplitude no eixo Y (μ m) e a posição perimetral do rebolo no eixo X (mm). O atuador deve

realizar o movimento da projeção da curva no eixo Y, segundo as posições delimitadas pela projeção no eixo X.

Figura 3-1 – Perfil de textura representado no plano de amplitude e posição perimetral do rebolo

Fonte: Produção do próprio autor.

Nos testes realizados pelos pesquisadores, a velocidade periférica de corte (v_s) foi de 30m/s, com máxima rotação (n_s) de 1300rpm. Nestes parâmetros, a frequência de trabalho do atuador para geração de apenas um ciclo senoidal por volta foi de 21,67Hz.

A frequência máxima de trabalho fornece a primeira análise para seleção do atuador. O conjunto formado pelo atuador e amplificador operacional deve ser selecionado levando em consideração as frequências de trabalho e a energia necessária para induzir a vibração com a amplitude requisitada. Esta análise determina a condição mínima de atuação para a aplicação. Claro que em aplicações do método é possível que sejam necessárias mais de uma única textura por volta do rebolo, o que demandaria frequências mais altas de resposta.

Complementar à amplitude e resposta, as texturas para aprimoramento operacional de mancais hidrodinâmicos apresentam o particular desafio de controle geométrico de seu perfil. Estas formas são estabelecidas por simulação computacional do comportamento do fluido em operação, sendo o desempenho otimizado atrelado à capacidade de reprodução precisa das medidas de projeto.

Esta característica de controle topográfico requer que o atuador possua precisão de movimentação durante as frequências necessárias para inscrição dos perfis. A microrampa, particular forma de interesse desta aplicação, requer que movimento de avanço e retração do atuador descreva a forma interna da textura, modificada pela relação de velocidades entre o rebolo e a peça. A microrampa, possui geometria interna formada por duas curvas de inclinação opostas, com ângulos diferentes para formar a geometria que funcionará para aprisionar o filme de óleo. As geratrizes lineares deste perfil estão apresentadas na Figura 3-2.

Figura 3-2 - Geratrizes lineares para projeção de perfil no perímetro do rebolo

Fonte: Produção do próprio autor.

A movimentação necessária do atuador requer velocidades de avanço e retração diferenciadas. As velocidades podem ser previstas ao avaliar o deslocamento de cada curva (projeção no eixo Y – Figura 3-2) e o tempo que este movimento deve ser realizado. O tempo de cada segmento é resultado do deslocamento perimetral do dressador em relação ao rebolo, sendo nesta análise a textura inscrita em todo seu comprimento. O segmento da textura que possui menor comprimento está associado a maior velocidade de atuação. Sendo assim, a velocidade que o atuador deve responder está associada ao segmento de maior inclinação.

Portanto, o atuador deve ser selecionado levando em conta dois fatores. A frequência de retração necessária para construção dos perfis na superfície do rebolo durante a dressagem e,

precisão posicional para reprodução da geometria nas tolerâncias desejadas. Estes dados são obtidos nas informações técnicas do conjunto atuador e amplificador e devem ser comparados à resposta em frequência do sistema mecânico que será construído.

3.1.2 Requisitos da Textura (controle de perfil e rugosidade)

As texturas para mancais possuem o objetivo de aprimorar os efeitos hidrodinâmicos que ocorrem na interface entre o fluido e as superfícies do eixo e mancal. Os típicos efeitos obtidos com a superfície customizada são: distribuição mais uniforme da força de sustentação ao longo da área do mancal, aprisionamento de partículas suspensas e redução dos esforços viscosos.

Estes efeitos são obtidos pela atuação do perfil interno das texturas. A geometria possui a funcionalidade de adicionar à superfície do mancal a dinâmica especial para distribuição dos esforços de sustentação, por exemplo. Esta dinâmica ocorre nas texturas com perfil de microrampas. Durante rolagem do eixo, o fluido na superfície é aprisionado contra os canais angulares da textura devido a diferença entre as áreas e, como resultado, este esmagamento causa aumento da força de sustentação.

O perfil da textura é formado pela remoção de material da superfície, segundo as condições de posição e profundidade impostas pela sua forma geométrica. O contato da ferramenta que fará esta remoção e a sua capacidade de corte são os fatores que determinarão a capacidade de reprodução dos perfis. Sendo assim, a ferramenta de corte deve ser capaz de realizar o movimento que descreve a textura e proporcionar a usinagem necessária para a inscrever a forma. No caso das microrampas, o contato deve proporcionar a remoção do material seguindo a forma das duas retas geratrizes com as angulações opostas que a descrevem.

Estas restrições particulares de controle posicional limitam as opções de métodos de fabricação que as atendam. O método deve possibilitar corte com controle de deslocamento e profundidade na escala micrométrica das texturas. Ao se relacionar os processos de texturização encontrados na literatura (Seção 2) com esta restrição de perfil, a usinagem é o único método que possui estas características. Esta viabilidade está associada a cinemática requerida para o processo de inscrição.

As tecnologias de fabricação a *laser* e *etching*, outras opções de texturização, possuem características inerentes ao método de remoção de material que limitam os perfis. Nestes processos, as inscrições são criadas sem contato direto da ferramenta de corte com a superfície. Utiliza-se alta concentração de energia (*laser*) ou corrosão química (*etching*) para remover o volume de material desejado. Esta forma de remoção possui apenas precisão do perímetro externo que descreve as texturas, não sendo possível controlar precisamente a profundidade ao longo do comprimento, nem formar um perfil. Em particular, o *etching* assegura que as formas inscritas no filme de corrosão serão projetadas na superfície da peça, porém a profundidade será constante em toda a projeção. Similar, os pulsos focalizados do *laser* também asseguram a posição onde a energia realizará a remoção do material, porém a profundidade e perfil resultante não podem ser precisamente controlados.

A usinagem, entretanto, inscreve as texturas devido o contato direto entre a aresta de corte e a superfície da peça. A remoção ocorre com a combinação do movimento da ferramenta, peça e avanço, de forma a produzir os esforços necessários que irão formar o cavaco. A geometria final é resultado dessa cinemática e o contato com a aresta de corte da ferramenta. Desta forma, a capacidade de se produzir o perfil da textura por usinagem está associada ao movimento relativo de corte realizado pelas arestas do rebolo em relação à peça.

Processos de usinagem possibilitam a formação de cavaco em escala micrométrica e que a ferramenta de corte seja capaz de descrever a trajetória necessária para reproduzir o perfil da peça. Eles atendem esta restrição de geometria, podendo ser aplicados para a texturização.

A retificação, usinagem com ferramenta abrasiva, possui as características necessárias para remoção de cavacos na escala micrométrica. Em complemento, trata-se de um processo já amplamente utilizado no controle dimensional e superficial de eixos e mancais hidrodinâmicos. Estas características representam as vantagens de se aplicar a metodologia de Texturização de Rebolos, proposta por Oliveira; Bottene e França (2010) e Bottene (2012).

Tendo em vista que a capacidade de controle dimensional dos perfis está associada a trajetória de contato que cada grão abrasivo executa durante o corte, a superfície resultante será formada pela sobreposição destas trajetórias. Para se poder entender mais profundamente esse processo e executar simulações, deve-se produzir um modelo descritivo que integre a cinemática do processo de retificação cilíndrica de mergulho com as características particulares da superfície texturizada da ferramenta de corte. A modelagem fornecerá avaliação analítica

para desenvolvimento da melhor estratégia de texturização associada ao perfil de textura desejado.

O contato de cada grão na retificação cilíndrica pode ser analisado segundo uma trajetória trocoidal. Esta parametrização foi proposta por Malkin (MALKIN; GUO, 2008), ao comparar a cinemática da retificação com o fresamento tangencial. Ao conhecer a trajetória dos grãos, a superfície final da peça pode ser analisada previamente ao corte para seleção dos melhores parâmetros de operação. Stepie (2011) analisou previamente estes movimentos para obter um modelo simplificado de contato com rebolo texturizado, aplicado a retificação plana. Em seu estudo, a textura final obtida na peça foi medida por perfilômetro e comparada com o modelo de previsão.

Estes modelos devem ser utilizados como ferramentas analíticas que permitam avaliar a capacidade da Retificação recriar o perfil de inscrição desejado. Somente com esta simulação o método de texturização de rebolos poderá ser avaliado quanto às suas restrições de perfil inscrito.

Complementar ao perfil da textura, a sua rugosidade deve ser controlada para que o resultado atenda o desempenho esperado. A rugosidade, em particular, está diretamente associada ao processo de corte durante texturização da peça. O contato entre os grãos abrasivos e a superfície de corte determina a resultante de rugosidade. Conforme proposto por Oliveira (1988) a dressagem possui a capacidade de controle dos parâmetros desejados de rugosidade. O macro e micro efeito da dressagem combinados influem no número total de arestas que farão contato com a peça durante o corte. Em suma, ao se combinar arestas de cortes pequenas com alta concentração por área do rebolo, valores inferiores de rugosidade são obtidos. No caso das texturas para mancais, esta particular capacidade da retificação de se utilizar o mesmo rebolo para obter diversos valores de rugosidade torna-se uma vantagem operacional. A mesma ferramenta pode ser aplicada para produzir a rugosidade desejada na parte interna das texturas e também na parte externa.

O método de texturização de rebolos deve ser avaliado segundo esta restrição de rugosidade. A estratégia de produção das inscrições deve ser capaz de controlar independentemente a rugosidade interna e externa das texturas resultantes na superfície da peça após a retificação.

3.1.3 Requisitos do Processo (custo, produtividade e flexibilidade)

Por fim, a metodologia desenvolvida deve ser capaz de atender os requisitos restritivos associados ao processo produtivo de virabrequins. A manufatura destes componentes automotivos é determinada pelos índices de desempenho da indústria competitiva atual. Atributos como: produtividade, flexibilidade e custo, são alguns dos principais parâmetros levados em consideração pelos gestores de produção das grandes corporações manufatureiras de autopeças. A metodologia de texturização, mesmo sendo capaz de aprimorar os resultados de desempenho dos mancais, somente terá alto potencial de aplicação se não comprometer estes já restritos parâmetros de produção.

A seleção da retificação como processo de manufatura das texturas alinha-se a este objetivo. A indústria manufatureira já utiliza amplamente este processo para produção de peças metálicas quando se objetiva alta produtividade e também altas restrições metrológicas. Em particular, a qualidade dimensional e geométrica de eixos e mancais são controladas pela combinação de processos abrasivos quando se busca a melhor relação de produtividade, custo e qualidade.

A texturização deve ser executada de forma a minimizar sua influência nos índices de desempenho dos processos de fabricação já empregados. Isto sendo atendido, o método poderá ser viável para aplicação em linhas de produção.

A proposta para atender este requisito é adaptar o processo de retificação comumente utilizado pela indústria. Os dados atualizados dos fabricantes de máquinas ferramentas apresentam o panorama de uso massivo de retificadoras CNC nas fábricas. Este tipo de equipamento da manufatura possui a flexibilidade necessária para a instalação dos dispositivos de texturização, além de precisão e repetibilidade na escala dimensional das texturas. Em complemento, a plataforma computacional destas máquinas pode ser integrada ao sistema de comando e controle do atuador para ampliar o controle do processo com outros sensores já instalados na máquina.

A proposta consiste na construção de um dispositivo que seja instalado junto ao dressador estático das retificadoras CNC. O mecanismo proposto é composto por: atuador, sensores de operação e base de fixação para ancoragem na mesa prismática da máquina. Este dispositivo deve possuir rigidez suficiente para não induzir excitação ao processo além da necessária para a texturização, assegurando a qualidade inerente da retificação. O dispositivo

de fixação do dressador deve ser projetado de forma a absorver os esforços da dressagem e, ao mesmo tempo, promover o movimento de avanço radial necessário para a texturização.

A restrição de custo do processo de texturização é atendida pela proposta de se utilizar um atuador instalado no mesmo equipamento de produção dos virabrequins. Isto posto, a texturização deve ser executada durante os ciclos de dressagem e de Retificação, já efetuados durante a manufatura das peças. Atribui-se assim, apenas os valores de aquisição, instalação e treinamento para uso do dispositivo ao custo total de implantação. Em complemento, os resultados previamente apresentados por Oliveira; Bottene e França (2010) e Bottene (2012) discutiram que as texturas não comprometem o desempenho do processo de retificação em si.

Complementar à redução da energia, a metodologia de texturização de rebolos não possui influência no tempo total do processo de retificação. O método possibilita que a produção da superfície texturizada da peça seja realizada durante os ciclos de retificação, sem a necessidade adicional de outro(s) processo(s). Assim, os eventuais impactos ao se adicionar outra etapa de fabricação não comprometem a produtividade da linha.

Por fim, o método deve também proporcionar a produção de perfis de texturas variados. O aprimoramento do desempenho de mancais depende de modelos matemáticos precisos que simulem o comportamento do lubrificante nas condições operacionais únicas que a funcionalização de superfícies possibilita. Assim, a cada aplicação específica de mancais, será desenvolvido um perfil de inscrição especial para potencializar a característica de mancal desejada. Frente à gama de aplicação das principais forjarias mundiais, o sistema deve ser capaz de se ajustar a diversos padrões de textura. Os requisitos apontados para a inscrição de texturas tipo microrampa, principal aplicação de interesse, fornecerão os valores referência para determinar os limites da metodologia proposta. Entretanto, outras formas de textura podem ser produzidas para analisar a flexibilidade do método.

A flexibilidade de operação é atendida pela composição de ferramentas complementares que orientem o projeto das texturas. Os requisitos de texturização apresentados nesta seção foram integrados por ferramenta computacional para a simulação do processo de texturização. O software é capaz de analisar as texturas comparativamente aos limites operacionais para programação aprimorada da texturização, requisito necessário para assegurar a aplicabilidade da texturização e também a flexibilidade de operação.

3.2 Metodologia para Texturização com Processo de Retificação

A texturização com o processo de retificação possui como metodologia fundamental a remoção de material da superfície da peça com uso de rebolo texturizado. A combinação entre as inscrições na ferramenta e os parâmetros do processo de corte definem a geometria da texturização na peça. Para cada aplicação o processo deve ser ajustado, de forma a atender aos objetivos propostos, como variações na geometria superficial ou perfil das texturas.

Ao avaliar os métodos de texturização disponíveis e suas restrições, a texturização por retificação é o método que possui maior potencial. A aplicação preliminar apresentada pelos pesquisadores (OLIVEIRA; BOTTENE; FRANÇA, 2010; BOTTENE, 2012) possibilitou que texturas pudessem ser construídas durante os ciclos normais de retificação e uma parametrização inicial do processo foi desenvolvida. Este método está descrito no fluxograma representado na Figura 3-3.

Figura 3-3 - Fluxograma da metodologia para Texturização de Rebolos

Fonte: (BOTTENE, 2012), adaptado pelo autor.

A principal restrição de mancais que ainda não foi avaliada na texturização por retificação é o controle de perfil das texturas. No processo desenvolvido, o mecanismo para a

criação das texturas realiza a direta projeção das inscrições nas superfícies do rebolo e, posteriormente na peça. A relação entre a velocidade de rotação do rebolo e da peça é o fator principal que define a topografia resultante no produto. Neste caso, a relação das velocidades entre rebolo e peça deve ser sempre um número inteiro para transferir a cada volta da peça a topografia sincronizada do rebolo. A dimensão superficial final das texturas na peça é resultado do produto da dimensão superficial da textura no rebolo dividido pela relação de velocidades (Figura 3-4).

Figura 3-4 - Método para projeção das texturas na superfície do rebolo

Fonte: (BOTTENE, 2012), adaptado pelo autor.

Tal parametrização da texturização de rebolos possibilita prever a dimensão das inscrições, entretanto não avalia o perfil gerado pelo contato. O contato dos grãos possui cinemática circular no processo de mergulho, sendo a geometria interna das texturas (raios mínimos) limitada à restrição deste movimento de corte. O contato das arestas com a superfície da peça pode ser avaliado segundo similaridade ao processo de fresamento tangencial com fresa circular. Este modelo de contato foi proposto por Malkin e será a referência metodológica adotada (MALKIN; GUO, Capítulo 3, 2008). Na Figura 3-5 esta analogia está representada.

Figura 3-5 - Modelo de cinemática de contato para retificação

Fonte: (MALKIN; GUO, 2008), adaptado pelo autor.

A análise do perfil da textura requer que o modelo inicial de contato seja complementado com a variação diametral determinada pela texturização inscrita no rebolo. A analogia com o processo de fresamento também aponta para esta associação. A mesma operação de fresamento tangencial resultará em superfície diferenciada ao utilizar, por exemplo, uma ferramenta de corte com distâncias variáveis entre o centro da fresa e as arestas de cada dente. A análise do perfil consiste em condicionar a alteração do diâmetro das arestas segundo o perfil de textura. O perfil que será inscrito estará limitado a máxima relação entre a profundidade e o comprimento que cada grão é capaz de reproduzir quando em contato com a superfície da peça no corte. Desta forma, quando a variação diametral entre dois grãos exceder o máximo arco de contato entre eles, haverá sobreposição das trajetórias. Na sobreposição, ao assumir que todo grão executará o corte, o grão com maior diâmetro limitará o perfil de contato.

Para análise inicial da cinemática de contato, o perfil de textura inscrito no rebolo é descrito pelo segmento AA'A'' (Figura 3-6). A distância entre cada grão abrasivo é mantida constante, representada pelo parâmetro l . Com esta parametrização, a avaliação consiste na sobreposição das trajetórias circulares de cada grão abrasivo, para composição da trajetória final. Neste mesmo modelo de Malkin (MALKIN; GUO, 2008), a avaliação do processo é

simplificada pela consideração da operação de retificação plana, ao invés da cilíndrica externa de mergulho. Esta aproximação é possível ao se considerar o diâmetro equivalente do processo.

O método de corte analisado é a retificação cilíndrica de mergulho, com corte discordante. Nesta cinemática, cada grão abrasivo descreve um movimento circular com velocidade angular constante e igual à velocidade angular do rebolo. Este movimento possui também a velocidade de deslocamento linear do seu centro, na direção tangente a peça e sentido discordante. Esta velocidade do centro é resultado da velocidade superficial da peça durante o corte. A combinação destas duas velocidades resulta em movimento trocoide, com velocidade de deslocamento do centro constante.

Em condições normais de retificação, cada grão abrasivo possui distância l e raio r constante, sendo esperado um perfil também constante na superfície da peça. A cada grão abrasivo que passa pela peça será incorporada a variação de raio (r) referente a profundidade do perfil (h) nesta posição periférica do rebolo.

O perfil de microrampas possui como limitação a inclinação representada pelas retas que a formam. A inclinação está delimitada pelo menor arco equivalente que o grão abrasivo poderá descrever. Ou seja, pode-se avaliar previamente a capacidade do processo pela análise da menor inclinação possível de ser reproduzida sem sobreposição.

A Figura 3-6 traz uma representação esquemática da retificação de uma rampa de textura em operação plana, onde a é a profundidade de corte e h_k é a profundidade da textura (Equação 3.1). O rebolo é considerado como uma fresa, conforme proposto por Malkin (MALKIN; GUO, 2008), com pontos de corte correspondentes aos seus dentes uniformemente espaçados a uma distância l . A dressagem produz o ângulo de textura no rebolo com uma redução linear no seu raio. Isso deve resultar em um aumento no tamanho da peça de h_k ao longo do segmento AA'.

$$h_k = \frac{d_{s1} - d_{s2}}{2}, \quad (3.1)$$

onde: d_{s1} – diâmetro externo da textura; d_{s2} – diâmetro interno da textura.

Na configuração de retificação discordante, o último ponto de corte do diâmetro mais externo do rebolo (d_{s1}) inicia seu contato com a peça de trabalho no ponto A, seguindo o caminho da curva azul para o ponto B, centrado em O, com uma profundidade de corte a . Deslocada na distância O-O', o próximo ponto de corte representa o primeiro do diâmetro mais

interno da rampa no rebolo (d_{s2}). Ele descreve o caminho da curva vermelha (A' para B'), mas sua profundidade de corte será entre zero e $a - h_k$, dependendo do avanço S . Então, na Figura 3-6, esse grão não tocará A superfície final da peça e o ângulo de rampa desejado não será produzido. Portanto, nenhuma aresta na rampa tocará a peça de trabalho.

Figura 3-6 - Representação esquemática das trajetórias de corte para um rebolo texturizado

Fonte: Produção do próprio autor.

O ângulo de rampa α_{td} é um parâmetro de projeto inserido no software de controle de dressagem. O ângulo de rampa obtido α_{tc} (Equação 3.2) será produzido pelo primeiro grão na superfície mais interna capaz de cortar do ponto A". O caminho da curva A" - B" representa um ponto de corte consecutivo do diâmetro mais interno, no qual é removida uma profundidade de corte igual a $a - h_k$.

O comprimento da rampa de textura (l_t) e o ângulo de passo da cavidade de textura (α_t) são parâmetros primários para o design da cavidade e representam restrições geométricas para um determinado rebolo, tamanho da peça e configuração cinemática.

Considerando a ordem de grandeza do diâmetro do rebolo e da profundidade da textura, o caminho da curva A-A" pode ser aproximado como uma linha reta. Assim, o ângulo da cavidade para a Figura 3-6 é definido por:

$$\alpha_{tc} = \tan^{-1}\left(\frac{h_k}{l_t}\right), \quad (3.2)$$

onde: α_{tc} – ângulo de rampa crítico.

A Equação 3.3 apresenta o valor de l_t de forma semelhante à expressão do comprimento de contato:

$$l_t = (h_k d_{s1})^{1/2}, \quad (3.3)$$

onde: l_t – comprimento de corte da textura; h_k – profundidade da textura.

Ao considerar o diâmetro equivalente (d_e) em vez de d_{s1} , a Equação 3.3 pode ser aplicada a configurações de retificação cilíndrica. Assim, será impossível produzir rampas com ângulos maiores que o valor crítico α_{tc} . Para valores α_{td} inferiores a α_{tc} , o ângulo resultante será α_{td} .

A cinemática aqui descrita será utilizada na simulação do processo. A aplicação de simulação está descrita no Capítulo 4, junto de seus parâmetros de desenvolvimento.

Por fim, a textura deve também atender a restrições de rugosidade. Entre as possibilidades para obter controle da rugosidade, a dressagem é a abordagem adotada. A composição do macro e micro efeito da dressagem possibilita que a qualidade superficial da peça retificada esteja de acordo com o projeto. Ao se utilizar a dressagem como processo de texturização, pode-se também controlar a agressividade do rebolo para atender aos critérios de rugosidade. Desta forma, o grau de recobrimento da dressagem consiste na parametrização que deve combinar a texturização e a agressividade. Esta constatação já foi conduzida nos trabalhos anteriores de Oliveira; Bottene e França (2010) e Bottene (2012), com valores de rugosidade similares nas peças retificadas utilizando rebolos liso e texturizado.

A produção das superfícies nestas condições será abordada em combinação da texturização com o processo de retificação de acabamento. Desta forma, as rugosidades

resultantes na área interna da textura e na superfície externa poderão ser individualmente controlada. Este controle é obtido pela combinação da retificação para texturização e acabamento com rebolo sem textura (liso). As análises desta combinação adotada estão descritas no Capítulo 4.

O método desenvolvido para a aplicação em mancais de virabrequins consiste na composição do controle de perfil e rugosidade com a metodologia de texturização de rebolos. O processo é complementado com o sistema para a simulação do comportamento da texturização, capaz de considerar as restrições do atuador (resposta em frequência) para movimentação do dressador e as restrições de contato entre rebolo e peça. Esta nova estrutura funcional está representada no fluxograma de processo descrito na Figura 3-7.

Figura 3-7 - Metodologia para Texturização com Processo de Retificação

Fonte: Produção do próprio autor.

A análise da restrição de movimentação do atuador considera o limite de resposta do dispositivo mecânico de movimentação do dressador. Esta restrição não deve ser obtida apenas pelos dados de operação fornecidos pelo fabricante do atuador, mas sim pelo desempenho final do conjunto em funcionamento durante a dressagem. O conjunto de atuação é composto pelos itens: atuador, amplificador operacional, mecanismo de fixação e o dressador ponta única. Todo este conjunto, quando montado e fixado na guia prismática da máquina, fornecerá a resposta máxima nas condições operacionais de texturização, ou seja, a resposta em frequência do sistema. Todavia, este resultado preciso é obtido quando a resposta em frequência for analisada durante a operação, sujeito aos esforços de dressagem e à rigidez de todo o conjunto. Na Figura 3-8 os itens do dispositivo de atuação e a análise do sistema em operação estão representados.

Figura 3-8 - Dispositivo de atuação e seus elementos

Fonte: Produção do próprio autor.

O método para determinar os limites da capacidade de resposta do sistema consiste na medição da resposta às frequências típicas de uso. O parâmetro de resposta analisado é o deslocamento do dressador que, quando comparado ao deslocamento desejado, fornece a atenuação causada pela dinâmica do sistema. O campo de frequências avaliado é baseado no levantamento prévio das condições que a texturização do rebole será executada. Nesta avaliação inicial, o objetivo é comparar a resposta do sistema livre com as condições prévias desejadas.

A frequência de atuação foi estabelecida levantando as condições extremas de velocidade periférica do rebolo e os perfis das texturas. A experimentação nestas condições determina as frequências e as amplitudes que o sistema responde, descrição operacional necessária para simulação real do processo de texturização. Esta avaliação foi conduzida para calibração do modelo desenvolvido para previsão do processo, os resultados estão descritos no Capítulo 4.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TEXTURIZAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

Neste capítulo está descrito o desenvolvimento dos sistemas propostos para capacitar a retificação como processo de texturização. Estes sistemas foram propostos baseados nas restrições de texturização para aprimoramento de mancais que a texturização de rebolos deve ser integrada, são eles: capacidade de atuação em altas frequências, aplicabilidade industrial e controle do perfil interno das texturas.

O requisito de atuação em altas frequências foi desdobrado segundo a função dinâmica que o dressador deve executar. Uma nova unidade de dressagem foi desenvolvida de forma a não causar influência significativa na resposta do atuador e reduzir os esforços não axiais ocorridos durante a texturização. Este mecanismo está descrito na seção 4.1.

A aplicabilidade da texturização está associada à capacidade de flexibilidade de atuação do método. O sistema de controle da texturização deve atender a esta função, sendo capaz de transformar padrões de modelos gráficos de texturas em pulsos elétricos de atuação. Na seção 4.2 este sistema está descrito, bem como os primeiros resultados para sua avaliação.

O controle geométrico da textura requer análise particular do contato ocorrido entre as superfícies do rebolo e da peça, durante a retificação. A restrição para controle preciso do perfil requer que esta função seja analiticamente avaliada. Sendo assim, o modelo de contato proposto por Malkin (MALKIN; GUO, 2008) foi utilizado para parametrização da retificação com rebolo texturizado. Esta modelagem está descrita na seção 4.3 e o sistema para integração da modelagem às outras restrições está detalhado na seção 4.4.

Por fim, os resultados dos testes preliminares executados para a calibração dos sistemas estão descritos na seção 4.5. Estes comprovaram o atendimento dos requisitos com as funções de dressagem e texturização desenvolvidas, além de fornecer os parâmetros de operação aplicados nas avaliações experimentais descritas no capítulo 5.

4.1 Projeto do dressador dinâmico

A texturização ocorre devido a alteração da profundidade de dressagem (a_d) durante o deslocamento do dressador na periferia do rebolo. A precisão das texturas inscritas está associada a capacidade de resposta rápida no movimento que o atuador será capaz de produzir

durante o restrito contato com o rebolo. O atuador deve atender a este requisito, com resposta em frequência e precisão posicional adequada para reproduzir a textura. Em especial para as microrampas, a resposta crítica é determinada pela inclinação máxima da rampa.

A restrição de resposta para inscrição da textura depende da relação entre a amplitude do movimento axial do dressador e o tempo deste movimento. Para levantamento dos valores iniciais é proposta a texturização de uma única rampa por volta do rebolo, com relação entre as inclinações estabelecida em 1:9, ou seja, a rampa mais acentuada ocuparia 1/9 do perímetro do rebolo ocupado pela rampa menos acentuada. A Figura 4-1 descreve o gráfico de amplitude *versus* tempo que o atuador deve movimentar para inscrever esta forma durante um ciclo de dressagem, com rotação do rebolo de 1300rpm.

Figura 4-1 - Projeção da textura microrampa (1:9) no tempo de atuação

Fonte: Produção do próprio autor.

Os atuadores piezoelétricos apresentam comportamento adequado para atender esta restrição. Sua construção, formada por empilhamento de discos de cerâmica piezoelétrica, é capaz de executar deslocamento mecânico em alta frequência e possui precisão em escala micrométrica. Em particular, a construção rígida do empilhamento possibilita que a fixação do dressador seja feita diretamente no atuador, reduzindo o efeito de amortecimento associado a fixação indireta. Esta estratégia foi adotada para proposição e fabricação do dressador dinâmico para a texturização.

O dressador dinâmico desenvolvido é composto por: atuador, dispositivo de fixação, dressador e módulo de amplificação. Estes itens foram selecionados e projetados para atender às restrições de atuação levantadas previamente.

O atuador selecionado para esta aplicação é o modelo P-225.8S, do fabricante *Physik Instrumente* (PI). Este modelo é utilizado em experimentos que exigem força de atuação alta, até 12500N. Possui deslocamento linear de até 120 μ m e sensor de posicionamento SGS (*strain gauge sensor*), para controle em malha fechada com precisão de 2,4nm. A frequência de ressonância é de 4kHz, limite que não será atingido para reprodução das texturas.

O módulo de amplificação para condicionamento do sinal elétrico enviado ao atuador também é produzido pelo fabricante PI. O modelo E-481 atende as especificações do atuador, entretanto apresenta atenuação de amplitude para respostas em altas frequência. Este conjunto amplificador e atuador possui como principais aplicações as que exigem precisão de posicionamento, mas não resposta em alta frequência. A Figura 4-2 descreve a curva de resposta do módulo amplificador quando sujeito a máxima amplitude, com destaque ao comportamento associado ao modelo de atuador escolhido. As curvas são determinadas de acordo com a capacitância dos instrumentos conectados. O atuador possui capacitância de 2600nF, sendo adotada a curva de 2000nF como referência para análise do sistema.

Figura 4-2 - Curva de resposta do módulo amplificador PI E-481

Fonte: (Physik Instrumente - E-481 User Manual, 2013), adaptado pelo Autor.

A faixa de frequência entre 100 e 1000Hz compreende a resposta limitante do conjunto para a aplicação proposta. O atuador possui como faixa de operação os limites de 0 a 1000V, que representa 0 a 120 μ m de deslocamento. Assim posto, em 100Hz (ou menos) o sistema possui resposta linear e sem atraso, com possibilidade de deslocamento dentro da variação máxima. Entretanto, com frequências próximas a 1000Hz, a atenuação do sinal chega a 90% da amplitude, o que na prática limita o deslocamento do dressador a 12 μ m. Este limite atende à frequência e amplitude associadas à produção das microrampas, porém esta característica informada pelo fabricante vale para o atuador livre e sem carregamentos.

O dressador selecionado para a aplicação na texturização possui construção com diamante de ponta única. Esta opção foi selecionada para obter a menor área de contato possível com o rebolo durante a dressagem. Desta forma, as inscrições podem ser produzidas com influência insignificativa da geometria do dressador, que poderia alterar os perfis inscritos. O modelo de dressador selecionado possui seção transversal quadrada, com dimensões de 0,6mm

x 0,6mm, fabricado pela empresa *Winter – Saint Gobain*. Foi escolhido este perfil para evitar a alteração da área de contato, alteração resultante do desgaste da ponta.

O dressador e o atuador são unidos pelo conjunto de fixação. Este conjunto é formado pela carcaça de alojamento do atuador e pela base para ancorar na guia prismática das máquinas retificadoras. O alojamento possui a função de isolamento do atuador aos esforços não axiais, medida necessária devido a fragilidade das cerâmicas piezoelétricas nestas direções. A liberdade de movimento axial é atendida com a fixação de duas molas planares, que pré-tensionam o atuador contra o flange de fixação do dressador. Este meio de fixação inibe que o dressador induza a flexão do atuador quando em contato com o rebolo, transmitindo apenas o esforço radial. A configuração deste mecanismo está representada na Figura 4-3.

Figura 4-3 - Módulo de dressagem dinâmica para a texturização

Fonte: Produção do próprio autor.

O monitoramento do contato entre o dressador e o rebolo foi obtido com uso de mapeamento por emissão acústica. Este método de mapeamento utiliza a intensidade do som, emitido pelo contato entre o grão abrasivo e o dressador, e a posição angular do rebolo para visualização da superfície da ferramenta. A superfície é reproduzida no software de

mapeamento, que combina a largura e o comprimento do rebolo com a intensidade RMS da emissão acústica. O resultado desta integração é a visualização da intensidade do contato entre a superfície do rebolo e o dressador. Este método foi desenvolvido por Oliveira (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001) e sua aplicação como ferramenta de monitoramento da reificação já foi comprovada durante as pesquisas prévias nesta área. Para visualização do método desenvolvido, a Figura 4-4 descreve a combinação de sinais e o resultado observado. No processo de texturização, o mapeamento fornece a análise da textura inscrita no rebolo.

Figura 4-4 - Mapeamento por emissão acústica utilizado no monitoramento da texturização

Fonte: (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001), adaptado pelo autor.

4.2 Desenvolvimento do sistema contínuo de dressagem

O processo de inscrição da textura é resultado do movimento radial do dressador sincronizado com a posição angular do rebolo durante a dressagem. A movimentação é realizada pelo atuador, que converte o sinal elétrico de controle em movimento de avanço do dressador. Este avanço transcreve a projeção da textura na superfície do rebolo, alterando a profundidade de dressagem (a_d) segundo o perfil interno da textura. O sistema de controle da

texturização executa estas funções, ao gerar o sinal elétrico enviado ao atuador e ao monitorar a posição angular do rebolo em tempo real.

O sistema de controle monitora o sinal digital do posicionamento angular do rebolo para sincronizar as ondas geradas com a posição da ferramenta abrasiva – referência 2 da Figura 4-5. O sinal de atuação é enviado ao módulo amplificador do atuador (referência 3), que o condiciona de acordo com as condições operacionais do piezoelétrico e o encaminha – referência 4. O sistema de aquisição de dados é composto pela placa de comunicação *PCI-6040E*, conector BNC, biblioteca de comunicação *NI DAQmx* e o software de controle para a texturização, desenvolvido em *LabView*. Para monitoramento do sinal enviado ao atuador, um osciloscópio analógico foi adicionado à montagem.

Figura 4-5 - Sistema de controle de dressagem

Fonte: Produção do próprio autor.

A funcionalidade de sincronização da textura consiste em segmentar a periferia do rebolo em seções igualmente espaçadas ao longo de sua circunferência. Cada seção tem o tempo necessário para o rebolo executar uma volta dividido pelo número de seções, sendo este valor utilizado como referência, conjuntamente com o número de voltas que o rebolo realiza durante o contato com o dressador. Com estes dois valores, o perímetro do rebolo pode ser mapeado de

acordo com a sua posição angular durante a dressagem. Esta posição, quando associada à velocidade de dressagem (v_d) e a velocidade de rotação do rebolo (n_s), descreve o movimento translatório do dressador, fornecendo sua posição perimetral e axial ao longo do tempo.

O sistema de controle utiliza a posição angular do dressador para transcrever a projeção das texturas no rebolo, ou seja, estabelece o valor diametral que cada posição deve ter para reproduzir o perfil. Este ciclo de projeção é realizado a cada volta do rebolo, com sincronização retroalimentada pelo sensor de posição instalado no eixo árvore da retificadora. A montagem do sistema completo de texturização está representada na Figura 4-6.

Figura 4-6 - Montagem do sistema de texturização em Retificadora CNC cilíndrica

Fonte: Produção do próprio autor.

Para atender à restrição de flexibilidade, o sistema de controle foi construído com duas principais ferramentas de modelagem: parametrização e projeção. Os perfis que possuem construção baseada em modelos parametrizados, com equacionamento descritivo de sua forma, são reproduzidos pelo software de controle segundo o próprio equacionamento que os define. Ao informar as dimensões do rebolo e os parâmetros de operação, o software integra a área do

rebolo ao cálculo das formas, produzindo um vetor de valores de deslocamento radial do dressador para cada volta do rebolo. Os valores de deslocamento representam a variação diametral necessária para inscrever, naquela volta, a seção da textura.

A função de projeção das texturas foi avaliada com a construção de perfis de textura para aprimoramento de mancais. As formas tipo *dimples* e *chevrons* foram encontradas na literatura como referências para aplicação de lubrificação e possuem parametrização de forma para ser utilizada na ferramenta.

Os *dimples* são perfis de forma semi-esférica, utilizados para funcionarem como reservatórios do lubrificante, reduzindo o atrito e diminuindo o desgaste. Sua parametrização de forma é determinada pela combinação de duas equações de circunferência: no plano do rebolo para projeção periférica e no plano perpendicular para projeção do perfil inscrito (profundidade). O seu desempenho funcional está associado a quantidade e arranjo, sendo a relação entre a área total e a texturizada o parâmetro de controle (S). A Figura 4-7 descreve o equacionamento e segmentação adotado para produção dos perfis esféricos.

Figura 4-7 - Parametrização de textura para lubrificação – *dimples*

Fonte: Produção do próprio autor.

Similar às formas semi-esféricas, os perfis de textura tipo *chevron* também possuem geometria parametrizada. É descrita pela forma de uma ponta de flecha, formada por dois canais de angulação oposta para direcionamento do lubrificante de acordo com a direção de giro do eixo em operação. Os canais são parametrizados segundo a angulação, largura e profundidade,

valores para estabelecer a área de textura. A Figura 4-8 descreve este perfil e a metodologia de projeção para a criação das texturas.

Figura 4-8 - Parametrização de textura para lubrificação – *chevron*

Fonte: Produção do próprio autor.

A proposição detalhada destas texturas e os parâmetros de dressagem e Retificação estão detalhados no trabalho desenvolvido pelo pesquisador Alexander Simon (SIMON, 2014), sendo aqui detalhado apenas o método aplicado para a projeção contínua (Figura 4-7 e Figura 4-8).

Os resultados experimentais comprovaram a funcionalidade de programação das texturas segundo parametrização dimensional. A análise destes resultados foi executada com a medição da circularidade e perfil. Estes estão representados nas Figura 4-9 e Figura 4-10.

Figura 4-9 - Resultado de texturização parametrizada de forma *dimple*

Fonte: (SIMON, 2014), adaptado pelo Autor.

Figura 4-10 - Resultado de texturização parametrizada de forma *chevron*

Fonte: (SIMON, 2014), adaptado pelo Autor.

A outra metodologia desenvolvida para controle topográfico das texturas consiste na direta projeção das inscrições na superfície do rebolo. Este método foi desenvolvido para atender ao objetivo de produção de texturas com formas externas complexas, em especial, geometrias baseadas em simulações de mancais hidrodinâmicos.

A funcionalidade de projeção foi incluída no sistema de controle da texturização com a integração de imagem ao processo de geração dos sinais. O sistema utiliza como referência para a geração dos sinais a imagem descritiva das formas, com representação da profundidade de atuação baseada na cor da textura. Nesta primeira versão, o sistema difere apenas na periferia da textura, sendo preto e branco a relação de cores associada à textura e superfície sem texturização, respectivamente. A metodologia de segregação em voltas do rebolo é a mesma adotada para as texturas parametrizadas, utilizando os dados operacionais da dressagem para geração do sinal de atuação. A Figura 4-11 descreve este processo.

Figura 4-11 - Metodologia para fabricação de texturas por projeção

Fonte: Produção do próprio autor.

A projeção está sujeita ao efeito de ampliação associado ao processo de transcrição das texturas à peça durante a retificação. Este efeito é resultado da relação entre as velocidades de rotação do rebolo e da peça, observado nos primeiros desenvolvimentos da texturização de rebolos e apresentados no capítulo 2. Visto isto, a funcionalidade escolhida para facilitar a construção de formas complexas consiste na avaliação da textura desejada na peça. O sistema de controle executa a alteração da imagem para a superfície do rebolo de acordo com a relação desenvolvida por Bottene (2012). Na Figura 4-11 esta modelagem está também representada.

A função de projeção foi atendida com a metodologia proposta. O sistema foi capaz de reproduzir as formas descritas em sinais de atuação. A proposição inicial destas formas foi baseada em logotipos ilustrativos, visto que nesta avaliação o objetivo foi a comprovação de resposta do sistema. Estes resultados estão descritos na Figura 4-12, com representação da

imagem selecionada, a imagem dressada no rebolo (mapeamento por emissão acústica durante a texturização) e o resultado na peça após a retificação de mergulho.

Figura 4-12 - Resultado de texturização por projeção

Fonte: Produção do próprio autor.

A funcionalidade de construção de texturas por parametrização e projeção comprovaram a capacidade do sistema desenvolvido para atender a restrição de flexibilidade levantada. O sistema está apto a adaptar-se para a fabricação de texturas baseada em modelos dimensionais e/ou imagens descritivas.

4.3 Modelagem do perfil microrampa para aprimoramento de mancais

A capacidade de reproduzir as inscrições para aprimoramento de mancais requer que além do controle periférico das texturas, a geometria interna seja obtida. A texturização destas com o processo de retificação pode ser efetuada com produção do perfil interno nas operações de dressagem (texturização do rebolo) e a retificação (transcrição para a peça durante o corte).

Nesta seção, a modelagem desenvolvida para a reprodução destes perfis durante a dressagem é detalhada.

Na dressagem, o perfil interno das texturas depende da capacidade de se reproduzir sua forma pela combinação do movimento do dressador dinâmico e a rotação do rebolo. O movimento do dressador é controlado pelo sistema de texturização, que planifica ao longo da circunferência do rebolo a textura e estabelece os valores de deslocamento do dressador.

As microrampas possuem variação de profundidade segundo a relação de inclinação das retas que as definem. Assim, a profundidade de cada posição de atuação pode ser estabelecida durante a geração dos sinais de atuação. O sistema deve combinar o plano de planificação (perímetro do rebolo) com a projeção das texturas. Este modelo está representado na Figura 4-13.

Figura 4-13 - Modelo de planificação e projeção para a geração de texturas tridimensionais

Fonte: Produção do próprio autor.

O método adotado para a decomposição do perfil consiste na parametrização segundo segmentos de onda senoidal. Esta aproximação foi escolhida por tipicamente caracterizar o comportamento dinâmico de corpos mecânicos e estar associada a resposta de um atuador

piezoelétrico. A composição consiste na divisão do perfil em dois segmentos: o perfil de entrada e saída da microrampa. Nesta análise, a periferia do rebolo é completamente inscrita com apenas um perfil de textura, atrelando assim a restrição de tempo dos segmentos de entrada e saída à volta do rebolo. A proporção de inclinação destes dois segmentos define a relação de tempo para que cada um seja executado, assim, para segmentos com proporção 1:9, por exemplo, a divisão de tempo segue a mesma proporção: 1/9 do tempo do segmento de entrada é o tempo do segmento de saída. O tempo, nesta aproximação, representa 1/4 do período da onda senoidal com amplitude igual à textura, determinando assim a frequência de trabalho. A Figura 4-14 representa esta modelagem.

Figura 4-14 - Modelagem do perfil microrampa segundo segmentos de onda senoidal

Fonte: Produção do próprio autor.

A modelagem senoidal foi avaliada comparativamente à curva de resposta do atuador piezoelétrico. A resposta foi obtida ao adquirir o sinal do sensor de posicionamento interno do atuador durante a texturização, na mesma condição de amostragem. O modelo foi capaz de representar o deslocamento do segmento representado pela frequência maior (saída), fator determinante para inscrição do perfil da microrampa.

O segmento de entrada da microrampa, por outro lado, teve comportamento mais próximo ao perfil de projeto do que a curva de modelagem proposta. Esta avaliação aponta a capacidade de resposta linear do dressador dinâmico às frequências mais baixas. Conforme descrito no manual do fabricante, o conjunto módulo amplificador e atuador possui resposta sem atuação abaixo de 100Hz. Este comportamento do dressador dinâmico foi confirmado com a análise de resposta em frequência, descrita nos testes preliminares (seção 4.5). Assim posto,

o perfil adotado para análise no simulador foi baseado na combinação da resposta do sistema e a forma de projeto da microrampa.

4.4 Sistema para simulação do processo de texturização com retificação

O processo de texturização por retificação ocorre pelo contato da superfície previamente texturizada do rebolo com a peça durante o corte. A inscrição está associada a cinemática de contato, que é determinada por trajetória trocoidal e assim impossibilita a análise prévia sem parametrização do contato. Este levantamento motivou o desenvolvimento do sistema computacional para determinar as limitações na reprodução dos perfis desejados.

O simulador desenvolvido realiza a análise da texturização durante as duas etapas do processo, a dressagem e a retificação. A etapa de dressagem possui como principal restrição a capacidade de resposta do dressador dinâmico, a etapa de retificação está determinada pelas características da cinemática de corte. A ferramenta de simulação foi proposta para combinar estas duas restrições e, assim, determinar o perfil capaz de ser reproduzido com o processo de texturização por retificação.

A avaliação da restrição de resposta do dressador é realizada comparando os limites do atuador com a demanda para reprodução do movimento. O modelo de análise do perfil é realizado segundo a aproximação por segmentos senoidais, como descrito no item 4.3, para cálculo das frequências descritivas de cada inclinação da microrampa.

A frequência de cada segmento é integrada com a amplitude do perfil para cálculo da velocidade de resposta requerida do atuador. Cada velocidade é comparada à limitação de resposta do atuador, obtida experimentalmente, para determinar a curva que é capaz de ser reproduzida. Este método de análise proporciona a avaliação do amortecimento esperado, sendo possível contornar este efeito com aumento da tensão do sinal gerado nas regiões críticas do perfil, limitado, obviamente, ao máximo de potência disponível no módulo amplificador. Este método de avaliação está representado na Figura 4-15.

Figura 4-15 - Metodologia para previsão da restrição do dressador dinâmico

Fonte: Produção do próprio autor.

O modelo proposto para avaliação da restrição de movimentação do dressador baseia-se na resposta em frequência obtida experimentalmente. A curva de resposta em frequência do dressador foi obtida pela indução de uma excitação do tipo CHIRP (um CHIRP é um sinal em que a frequência aumenta (*up-chirp*) ou diminui (*down-chirp*) com o tempo) no amplificador do piezo-atuador e monitorando o deslocamento real na ponta do dressador. O comportamento observado foi analisado ao comparar o deslocamento obtido a cada frequência induzida. A variação de frequência escolhida para análise foi estabelecida segundo a modelagem senoidal associada à texturização. A menor frequência consiste na inscrição de apenas um ciclo senoidal completo por volta do rebolo, sendo seu período limitado ao tempo de uma volta do rebolo. Cada frequência induzida consiste em múltiplo integral desta, limitado à máxima frequência esperada para as aplicações propostas. O resultado desta análise está descrito na seção 4.5.

A restrição da retificação é analisada pelo software ao simular a cinemática de contato realizado por cada segmento do rebolo durante uma volta completa em contato com a peça. Para cada segmento é calculado o diâmetro equivalente e a profundidade de textura correspondente ao setor que representa. O diâmetro equivalente é proposto por Malkin (MALKIN; GUO, 2008) para aproximação da retificação cilíndrica à plana, simplicidade matemática adotada para composição da trajetória. O cálculo está representado na equação 4.1,

sendo o sinal positivo no denominador referente à condição de análise proposta – retificação cilíndrica externa:

$$d_e \equiv \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}}, \quad (4.1)$$

onde: d_s – diâmetro do rebolo; d_w – diâmetro da peça.

A profundidade da textura associada ao segmento é somada ao diâmetro equivalente para simulação da trajetória com a alteração induzida pela textura. A profundidade da textura é calculada ao se segmentar o perfil da textura com a mesma proporção adotada para a simulação do rebolo. O perfil utilizado para cálculo da profundidade da textura foi previamente condicionado à restrição de resposta do dressador dinâmico, sendo considerado o valor já atenuado. O resultado deste cálculo determina o raio da circunferência que será utilizada para simulação do contato, descrito na equação 4.2:

$$r_n = h_n + \frac{d_e}{2}, \quad (4.2)$$

onde: h_n – altura da textura na divisão n .

A trajetória de cada segmento n é simulada segundo a equação de movimento trocoide, sendo utilizado o raio calculado pela equação 4.2. A trocoide é utilizada para descrever o movimento circular uniforme com deslocamento linear do centro em velocidade também uniforme. A equação geral de uma trajetória trocoidal é representada pelas equações 4.3 e 4.4:

$$x = x' + r_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1), \quad (4.3)$$

$$y = y' + r_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1), \quad (4.4)$$

onde: (x', y') , ponto central da trajetória circular.

Ao admitir deslocamento linear uniforme do centro (x', y') , com velocidades v_x e v_y , a equação da trajetória trocoidal pode ser representada por:

$$x = x' + r_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + v_x t, \quad (4.5)$$

$$y = y' + r_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + v_y t, \quad (4.6)$$

Para a particular aplicação na retificação cilíndrica externa discordante, os elementos da equação podem ser substituídos pelos valores operacionais do processo. A velocidade angular do movimento circular uniforme representa a velocidade angular do rebolo (ω_s). A velocidade linear do centro (x', y') é descrita pela velocidade superficial da peça (v_w), tendo apenas componente na direção de corte, representada pelo eixo x . O valor de raio considerado é referente ao diâmetro equivalente somado à profundidade da textura neste segmento do rebolo (r_n). Assim, a equação é definida por:

$$x = x' + r_n \cos(\omega_s t + \phi_1) + v_w t, \quad (4.7)$$

$$y = y' + r_n \sin(\omega_s t + \phi_1), \quad (4.8)$$

A simulação consiste na sobreposição das trajetórias de cada segmento n do rebolo para avaliação do contato final obtido. O contato final é calculado segundo a condição de contorno estabelecida para considerar o corte realizado por cada segmento, ou seja, o segmento com maior amplitude prevalece até ser substituído por outro que supere tal amplitude. Esta condição é avaliada ponto a ponto, segundo a mesma divisão de segmentos adotada para a análise do rebolo.

O software para realizar esta análise foi desenvolvido na plataforma de programação *LabView*. Esta linguagem foi selecionada devido à facilidade de reprodução gráfica do contato e por ser a mesma plataforma utilizada na programação do sistema de controle do dressador. O

simulador calcula a curva trocoidal de cada segmento do rebolo e a reproduz em gráfico XY para visualização. São utilizados para o cálculo da trajetória os valores operacionais da retificação: diâmetro do rebolo (d_s); diâmetro da peça (d_w); velocidade de rotação do rebolo (n_s), velocidade de rotação da peça (n_w), o perfil de textura selecionado e o número de pontos a ser considerado (n). O resultado desta avaliação é representado no gráfico XY, ilustrado na Figura 4-16. Cada linha do gráfico representa o grão abrasivo representativo analisado, sendo o resultado final a sobreposição destas segundo análise de profundidade máxima obtida.

Figura 4-16 - Simulação das trajetórias dos segmentos do rebolo durante a Retificação – com texturização

Fonte: Produção do próprio autor.

O contato com a peça pode ser visualizado na trajetória quando apenas a profundidade de retificação é avaliada. Esta visualização em amplificação a apenas o contato está representada na Figura 4-17.

Figura 4-17 - Visualização da profundidade de corte segundo as trajetórias simuladas

Fonte: Produção do próprio autor.

A composição do contato final está representada na Figura 4-18. Cada segmento é comparado para determinar a trajetória que removeu maior volume de material, esta é utilizada como referência até o próximo ponto de análise. A cada ponto a mesma comparação é feita para assim obter sempre o perfil representativo do corte. É considerado corte sempre que há contato com a peça, sem levantamento de hipóteses quanto a eventual conformação ou outro efeito que não proporcione a remoção do cavaco.

Figura 4-18 - Perfil simulado da textura reproduzida na superfície da peça durante a Retificação com rebolo texturizado

Fonte: Produção do próprio autor.

A textura considerada pelo simulador de contato depende das condições de resposta do dressador dinâmico. Por este motivo, a restrição de dressagem é previamente considerada para condicionar o perfil segundo as limitações operacionais. O perfil corrigido é reproduzido na

escala do perímetro do rebolo para avaliação do contato. Este resultado final está representado na seção 4.5.

4.5 Testes preliminares

A composição final do sistema desenvolvido para a texturização com processo de retificação requer a avaliação de desempenho experimental do dressador dinâmico para integrar este limite ao software de simulação. O modelo somente é capaz de representar a textura reproduzida na superfície do rebolo, quando levado em consideração o limite real do atuador durante a operação de dressagem. Esta análise foi realizada ao comparar o deslocamento do atuador com a amplitude induzida no sistema. A resposta foi analisada de acordo com o espectro de frequência associado à aplicação da texturização de microrampas, estabelecida segundo o modelo de aproximação por onda senoidal adotado (seção 4.3).

A avaliação da resposta foi realizada com associação de dois métodos comparativos. A primeira análise considera o dressador livre, sem o esforço necessário para inscrição da textura no rebolo durante a dressagem. Esta experimentação fornece o valor base de desempenho do conjunto, com a leitura de deslocamento realizada diretamente pelo sensor de retroalimentação presente no atuador. Entretanto, o determinante para o processo de texturização é a profundidade real produzida no rebolo. Por este motivo foi realizada também a medição da topografia do rebolo após texturização com o espectro de frequência avaliado. A combinação destes resultados forneceu o limite de resposta do dressador quando sujeito às condições de operação determinadas.

Os testes experimentais foram realizados com os mesmos parâmetros utilizados na simulação, de forma a possibilitar a comparação dos resultados. O sistema de controle da texturização foi utilizado para a geração do sinal de entrada do sistema, adaptado para a produção de sinal senoidal com amplitude constante e variação da frequência ao longo do tempo (CHIRP). A alteração da frequência foi sincronizada à rotação do rebolo para possibilitar a transcrição ao rebolo durante a dressagem. O espectro de frequência foi linearmente variado em múltiplos da frequência de rotação do rebolo (n_s). Desta forma, somente foram inscritos ciclos completos da onda a cada sincronização. A variação das frequências, assim condicionada,

possibilita que os resultados de resposta livre possam ser comparados ao perfil inscrito no rebolo, mesma metodologia da texturização.

A análise sem contato foi realizada com variação de frequência entre 21Hz e 1176Hz, o que representa 1 a 56 ciclos de onda seno inscritos a cada volta do rebolo. Esta janela de frequência foi determinada para avaliação experimental da atenuação informada pelo fabricante do amplificador e atuador. É esperada atenuação após 100Hz e resposta abaixo de 10% após 1000Hz (Figura 4-2– Seção 4.1). As condições do experimento estão descritas no Quadro 4-1.

Quadro 4-1 - Parâmetros de operação para experimento de resposta em frequência livre

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade angular do rebolo (n_s)	1260	rpm
Velocidade de dressagem (v_d)	378	mm/min
Amplitude sinal seno	1	Volt
Deslocamento linear esperado do dressador	+12 a -12	μm
Frequências analisadas	21 a 1176	Hz

O sinal do sensor de posicionamento do atuador e a onda de controle enviada ao atuador foram analisados após aquisição destes sinais analógicos com software desenvolvido também em *LabView*. A Figura 4-19 ilustra o comportamento observado da amplitude de movimento com a frequência induzida no sistema.

Figura 4-19 - Análise de reposta em frequência do dressador dinâmico em carregamento livre

Fonte: Produção do próprio autor.

O comportamento experimental foi muito similar à curva de resposta informada pelo fabricante. A resposta teve comportamento linear apenas até, aproximadamente, 105Hz. Após este estágio, o valor de amplitude teve amortecimento incremental até atingir o mínimo de 2,35 μm de amplitude. A curva de velocidade do atuador também está descrita na Figura 4-19,

obtida pela integração do deslocamento ao tempo do ciclo. A máxima velocidade de resposta foi limitada em $3004,38\mu\text{m/s}$, atingida em $835,11\text{Hz}$. Para comparação, a velocidade requisitada também foi incluída, demonstrando a necessidade de amplificação após os 105Hz . A frequência que delimita a capacidade de resposta foi observada no pico da velocidade, onde mesmo com amplificação, o atuador não possui energia para manter a amplitude.

Os dados obtidos com carregamento livre foram comparados ao desempenho do dressador quando sujeito aos esforços da dressagem. As mesmas condições de excitação foram utilizadas neste experimento de calibração, porém foi realizado o contato do dressador com o rebolo, com inscrição dos perfis no rebolo. Os parâmetros de operação desta avaliação estão descritos no Quadro 4-2.

Quadro 4-2 - Parâmetros de texturização para avaliação de resposta

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade angular do rebolo (n_s)	1260	rpm
Velocidade de dressagem (v_d)	378	mm/min
Amplitude sinal seno	1	Volt
Deslocamento linear esperado do dressador	+12 a -12	μm
Frequências analisadas	21 a 1176	Hz
Profundidade de dressagem (a_d)	0 a 24	μm
Largura de dressagem (b_d)	0,6	mm

A texturização do rebolo ocorreu com apenas um passe de dressagem, com profundidade de $12\mu\text{m}$. A esta profundidade foi somada a amplitude da onda, ou seja, era esperado no rebolo profundidades de dressagem variando de 0 a $24\mu\text{m}$ (relação ao somar o a_d ao deslocamento dinâmico radial do dressador). A medição do perfil inscrito foi obtida com a dressagem incremental do rebolo com dressador estático (sem penetração radial) e profundidade de dressagem (a_d) de $1\mu\text{m}$. Cada passe de dressagem foi monitorado com uso da ferramenta de mapeamento por emissão acústica, medindo as profundidades das texturas de acordo com o contato observado no mapeamento. Os ciclos da onda seno foram inscritos na superfície completa do rebolo, de forma sincronizada com a rotação para comparação das profundidades

ao longo do perímetro. A Figura 4-20 apresenta os passes de dressagem realizados para a medição da resposta.

Figura 4-20 – Mapas acústicos de passes de dressagem para determinar resposta em frequência do dressador dinâmico em operação

Fonte: Produção do próprio autor.

A visualização do comportamento das texturas está destacada no mapa de emissão acústica representado na Figura 4-21. As amplitudes representativas foram observadas somente até a metade da largura do rebolo, região com variação de 21Hz a 588Hz, aproximadamente. Após este segmento a amplitude das ondas inscritas se aproxima da profundidade de dressagem, tornando a imagem do mapeamento indiferente para o cálculo da amplitude. Este valor reflete o mesmo comportamento observado na avaliação livre de esforços, com valores de amplitude similares.

Figura 4-21 – Detalhe de um passe de dressagem para avaliação da resposta em frequência do dressador dinâmico durante a texturização

Fonte: Produção do próprio autor.

A capacidade de resposta do sistema de texturização teve comportamento teórico e experimental similar. Mesmo quando sujeito aos esforços da dressagem e em contato com o rebolo, a amplitude do movimento teve comportamento determinado pela curva de resposta do amplificador de potência. Não foi possível observar influência representativa do contato do dressador com o rebolo ou a rigidez estrutural da retificadora na resposta do atuador nas frequências de trabalho determinadas. Assegura-se, assim, que o comportamento dinâmico pode ser previsto e modelado para compor a simulação do processo. No capítulo 5 este modelo foi comprovado ao comparar o perfil inscrito na peça com a previsão determinada pelo software segundo as restrições de atuação e de geometria de contato. Os resultados comprovaram a eficácia da ferramenta e também do sistema desenvolvido para texturização com o processo de retificação.

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO

O sistema desenvolvido para texturização com o processo de retificação foi avaliado experimentalmente na condição de aplicação proposta, a produção de microrampas. Neste capítulo estão descritas estas avaliações, bem como a discussão sobre os resultados obtidos.

A experimentação foi conduzida no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). O laboratório possui os equipamentos necessários para condução destes experimentos, além da prévia experiência no processo de Texturização de Rebolos.

Os parâmetros de controle comparativos do processo foram estabelecidos pela combinação das informações técnicas disponíveis na patente referência de microrampas e discussões com o parceiro industrial deste trabalho. A empresa ThyssenKrupp Metalúrgica Campo Limpo LTDA estabeleceu convênio de parceria que amparou o desenvolvimento deste trabalho. A aplicação principal adotada foi motivada por esta parceria, com grande interesse de transição tecnológica dos resultados obtidos. Além disso, houve um contrato de propriedade intelectual firmado entre a empresa e a Fundação para Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI, representante da EESC-USP neste convênio, que envolve futuras aplicações do método em clientes da empresa parceira na Alemanha. Os dados operacionais descritos aqui foram propostos para validação experimental do sistema e modelo desenvolvido, sem ainda o caráter de otimização para a aplicação na produção de virabrequins. A comprovação também foi aplicada nos parâmetros de estudos de mancais propostos pelo parceiro, cujo escopo não faz parte dessa pesquisa.

Neste capítulo, a experimentação realizada é descrita em duas principais seções. A calibração do sistema de acordo com o resultado experimental obtido é detalhada na seção 5.2. Este estágio foi conduzido para avaliar a capacidade de predição do simulador e levantamento das condições experimentais que foram adotadas nos testes seguintes. A seção 5.3 descreve esta outra avaliação, onde variáveis do perfil foram propostas para determinar a capacidade do processo de retificação na reprodução das microrampas.

Os materiais, equipamentos e condições gerais de experimentação estão detalhados na seção 5.1. A metodologia do processo e os parâmetros que foram analisados estão descritos no capítulo 3, com a discussão das particularidades que foram adotadas para o perfil inscrito.

5.1 Materiais, equipamentos e condições gerais dos testes experimentais

A retificadora cilíndrica CNC utilizada nos ensaios foi o modelo *Numerika G-800-HS*, produzida pelo fabricante nacional *Zema*. Este equipamento está instalado no LAPRAS-NUMA-EESC-USP e possui os sistemas de apoio necessários para as avaliações requisitadas. A máquina dispõe do sistema de monitoramento por emissão acústica *Sensis MSM*, utilizado para aquisição do mapeamento da superfície do rebolo. Possui também o sistema de medição em processo *Marposs E9*, aplicado para a retificação dos eixos de teste com controle dimensional, condição que tipicamente é adotada na produção de virabrequins.

O controle de desbalanceamento do rebolo é executado com o sistema de monitoramento e autobalanceamento *Marposs E79*. Este sistema é dotado de mecanismo com contrapesos para compensar o desbalanceamento do rebolo durante a retificação. Esta estratégia é importante para a avaliação do processo de texturização, devido à retificação ocorrer com relação sincronizada de rotação entre a peça e o rebolo. A vibração eventual ocorrida pelo desbalanceamento compromete a medição das texturas, o que prejudicaria a análise comparativa. A foto da Figura 5-1 ilustra os sistemas de monitoramento aplicados a texturização e a Figura 5-2, a visão geral da retificadora CNC.

Figura 5-1 – Painel de controle e dispositivos instalados na retificadora CNC utilizada na experimentação

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5-2 – Visão geral da retificadora CNC utilizada – Zema Numerika G-800-HS

Fonte: Produção do próprio autor.

O rebolo utilizado nos ensaios foi determinado segundo orientações do fabricante de rebolos *Saint-Gobain* e a empresa parceira deste trabalho. O modelo selecionado apresenta as condições desejadas na retificação de virabrequins, adequado ao material e a qualidade final das peças. O rebolo selecionado é o 55A46.1K8VC1, produzido com grãos de óxido de alumínio e com largura de 50mm. As condições de corte apropriadas para o corte do material selecionado são: velocidade de corte - $v_s = 30m/s$ e velocidade de avanço - $v_f = 0,180mm/min$.

Os eixos empregados nos testes foram produzidos de forma a simular as dimensões e características dos munhões de um modelo de virabrequim. São fabricados em aço ANSI 4340, com endurecimento padronizado em 50 a 55HRc. Os eixos possuem diâmetro de 50mm, com largura retificável também de 50mm. O desenho técnico destes eixos é omitido nesta tese devido a indicações de fixação e outros dados que especificamente descrevem a aplicação do parceiro industrial. As dimensões possuem apenas caráter comparativo para análise dos resultados medidos.

O dressador ponta única utilizado foi o mesmo adotado nos testes conduzidos para validação do modelo de parametrização das texturas. É construído de um único diamante, lapidado com perfil quadrado e constante ao longo de sua altura. As condições de dressagem foram as mesmas em todos os testes: largura do dressador - $b_d = 0,6mm$, profundidade de dressagem - $a_d = 12 a 24\mu m$ e grau de recobrimento $U_d = 6$.

O sistema de controle de dressagem, adaptado para a construção das microrampas, está representado nas figuras seguintes. O painel de controle deve ser parametrizado com as condições em que será executada a texturização, para que a sincronização seja feita pelo software. Os grupos de parâmetros informados são: aquisição da posição angular do rebolo e contato (Referência 1 – Figura 5-3), geração analógica do sinal de atuação (Referência 2 – Figura 5-3) e parametrização da rampa (Referência 3 – Figura 5-3).

Figura 5-3 - Painel de controle do software para texturização de microrampas

Fonte: Produção do próprio autor.

Os sinais analógicos monitorados pelo sistema são a posição angular do rebolo e o valor RMS da emissão acústica. A posição angular é obtida ao analisar o sinal do sensor indutivo instalado no flange de fixação do rebolo na retificadora. Cada pulso deste sinal é monitorado para retroalimentar a geração do sinal de atuação, que é disparado a cada início de volta. A retroalimentação fornece ao sistema o valor real do tempo da volta do rebolo, utilizado para definição da taxa de amostragem do sinal gerado para assegurar inscrição na volta completa do rebolo. Esta funcionalidade é executada com uso da biblioteca *DAQmx* da *National Instruments*, programada para associar o valor analógico com o pulso de temporização do *trigger*. Esta estratégia de programação está representada no diagrama de blocos ilustrado na Figura 5-4.

Figura 5-4 - Diagrama de blocos da função de sincronismo entre sinal analógico de geração e temporização

Fonte: Produção do próprio autor.

O sinal analógico RMS da emissão acústica fornece ao sistema de texturização a confirmação de contato entre o dressador e o rebolo. Este parâmetro é utilizado pelo software para cálculo do deslocamento axial do dressador durante a texturização, dimensão associada à distribuição longitudinal da textura. O software calcula o número de voltas que o rebolo executa durante a texturização baseado no grau de recobrimento (U_d) e a largura de dressagem (b_d). O contato inicial do dressador é necessário para determinar o ponto referência do sincronismo. O contato é medido com leitura do sinal de emissão acústica e sua comparação com valor de referência para indicação de contato. O valor de referência, *trigger*, foi experimentalmente definido como 2V, valor mínimo para assegurar monitoramento do contato entre o dressador e o rebolo. A Figura 5-5 representa essa funcionalidade do software.

Figura 5-5 - Função de sincronismo longitudinal de texturização com sinal RMS de emissão acústica

Fonte: Produção do próprio autor.

O perfil das microrampas é parametrizado baseado no número de pontos que o software é programado para integrar a textura. O número corresponde à divisão do comprimento do rebolo em segmentos de interpolação linear, valor que será utilizado para cálculo do vetor deslocamento. O perímetro do rebolo dividido pelo número de pontos resulta no comprimento periférico que cada segmento terá. Assim, quanto maior número de pontos, mais preciso será o perfil da textura. A relação entre as inclinações da microrampa é utilizada para o cálculo do número de pontos que será utilizado na representação de cada lado do perfil. O número máximo de pontos está limitado pela capacidade de processamento do computador no qual o sistema de controle está instalado. Nos testes iniciais, a melhor relação entre processamento e precisão da texturização foi obtida com 1000 pontos/volta.

O vetor de deslocamento é condicionado à parametrização temporal necessária para geração do sinal analógico de atuação. O tempo é calculado pelo software baseado na velocidade de rotação (n_s) do rebolo. O número de pontos e o tempo limitante do sinal determinam a taxa de amostragem que será utilizada na geração analógica. Esta taxa é corrigida a cada volta para precisão de posicionamento angular da textura no rebolo. Entretanto, este método de sincronismo com *trigger* externo requer que o software execute a geração e leitura simultaneamente. Com a biblioteca *DAQmx* e a placa de aquisição utilizada a simultaneidade não é possível de ser executada. Para contornar esta limitação, o software calcula a taxa de amostragem considerando uma constante de atraso, para que o sinal de geração seja

percentualmente menor do que o sinal de sincronismo obtido. Este método possui como efeito colateral a impossibilidade de texturização em todo o comprimento do rebolo. O valor desta constante de atraso também está associado a capacidade de processamento do computador, sendo obtido experimentalmente o valor de 8% para o conjunto utilizado nos testes. Como resultante deste atraso, 8% do perímetro do rebolo não pôde ser texturizado.

A placa de aquisição e geração de sinais utilizada é produzida pelo fabricante *National Instruments*. O modelo adotado, *PCI-6040E*, foi selecionado por possuir capacidade de sincronismo com sinal externo de *trigger*, além de taxa de amostragem adequada para evitar sobrecarga no processador. Este modelo é compatível com as bibliotecas de comunicação de dados (*DAQmx*) e com a plataforma de programação *LabView*, requisitos mínimos adotados para a seleção.

A medição do perfil inscrito na peça foi realizada com o medidor de circularidade digital *Talyround – 131*, do fabricante *Taylor Robson*. O software *ultra* fornece a os valores de deslocamento da ponta de medição em contato com a peça de acordo com a posição angular. O resultado desta análise é a visualização da alteração diametral que a textura ocasiona, em plotagens polar e linear. Para efeito comparativo, todas as medições foram executadas com mesma metodologia e parametrização: faixa de medição – 0,4mm; filtro de *gauss* 1-1500upr. Foi utilizado apalpador com ponta esférica de diâmetro de 2mm, menor área de contato disponível no equipamento. Tal valor foi considerado suficiente, tendo em vista que as texturas foram geradas pelo rebolo, cujo diâmetro é muito maior.

O gráfico de circularidade construído com este equipamento é adotado como referência para comparação do desempenho do processo de texturização. O perfil da microrampa, a simulação das restrições da texturização e a medição de circularidade são comparadas para determinar a capacidade do processo. O gráfico de circularidade foi obtido ao exportar o arquivo da medição em pontos (θ_i, d_i) , onde θ_i indica a posição angular do ponto i e d_i o diâmetro neste ponto. A geração desta matriz de valores foi obtida ao exportar o arquivo *.pln* para o software de análise da Taylor Hobson e assim geração de arquivo para a análise.

5.2 Validação experimental das restrições da texturização e simulador

Os testes preliminares realizados para levantamento da resposta em frequência do dressador dinâmico confirmaram o comportamento de atuação esperado. A faixa crítica de 100 a 1000Hz delimita a necessidade de correção da amplitude no atuador para que o valor do deslocamento realizado seja o mesmo do projetado em frequências acima dos limites de resposta plana.

A validação experimental da correção da amplitude de atuação foi realizada com a análise individual da principal faixa de frequência associada à inscrição das microrampas: 21 a 360Hz, o que representa 1 a 17 ciclos senoidais inscritos em cada volta do rebolo. Esta análise foi conduzida com experimentos de texturização com frequência constante em toda a largura do rebolo. A resposta foi avaliada com a leitura do deslocamento medido pelo sensor de posicionamento do atuador (SGS) e as amplitudes obtidas pelo mapeamento acústico de sucessivas operações de dressagem do rebolo com dressador estático, mesmo método adotado nos testes preliminares (Capítulo 4, seção 4.5). Os parâmetros de operação utilizados nos experimentos estão descritos no Quadro 5-1.

Quadro 5-1 - Parâmetros de operação utilizados na experimentação de resposta

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade angular do rebolo (n_s)	1260	rpm
Velocidade de dressagem (v_d)	126	mm/min
Amplitude sinal seno	1	Volt
Deslocamento linear esperado do dressador	-6 a +6	μm
Frequências analisadas	21 a 357	Hz
Profundidade de dressagem (a_d)	12	μm
Largura de dressagem (b_d)	0,6	mm

Foram realizadas seis texturizações, sendo elas estabelecidas na configuração de: 1 (21Hz), 3 (63Hz), 6 (126Hz), 9 (189Hz), 12 (252Hz) e 17 (357Hz) ciclos senoidais por volta. O resultado da medição de amplitude obtida no sensor de posicionamento e no rebolo está representado no gráfico ilustrado na Figura 5-6.

Figura 5-6 - Amplitude de resposta do dressador dinâmico nas frequências de aplicação

Fonte: Produção do próprio autor.

A avaliação dos sinais de resposta obtidos no sensor de feedback do atuador e na dressagem do rebolo apresentaram valores similares. Assim, o sensor SGS pode ser confiável para a retroalimentação adotada para determinar a amplitude que será induzida no atuador. O SGS apresenta leitura mais simples de ser executada devido não ser necessário induzir a texturização no rebolo para sua medição. Em complemento, a curva de resposta já possui modelo obtido pela aquisição no teste preliminar de desempenho (Figura 4-19 – Seção 4.5). A amplitude que foi utilizada nos experimentos de avaliação foi determinada com base neste resultado.

Entretanto, é esperado que o contato trocoidal da texturização durante a retificação também influencie na amplitude inscrita na peça. Esta restrição do contato trocoidal foi avaliada com a inscrição das texturas na peça com a retificação. Para cada frequência foi realizada o corte, com o rebolo texturizado, de uma peça teste. O resultado da texturização obtida na superfície da peça foi analisado com a medição da circularidade no equipamento *TalyRound 131*. A avaliação fornecida pelo equipamento e adotada nesta análise é a representação gráfica polar, com representação da variação diametral ao longo do deslocamento angular da medição. O objetivo foi comparar este perfil ao reproduzido pelo simulador, já considerando a atenuação

de amplitude ocorrida devida a limitação de resposta em frequência do sistema de atuação. As condições de retificação foram as mesmas para todas as peças, estes parâmetros estão descritos no Quadro 5-2.

Quadro 5-2 - Parâmetros de retificação para texturização com perfil senoidal - análise de profundidade

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade angular do reboło (n_s)	1320	rpm
Velocidade de dressagem (v_d)	132	mm/min
Amplitude do sinal de atuação	1	Volt
Deslocamento linear esperado do dressador	-6 a +6	μm
Frequências analisadas	21 a 357	Hz
Profundidade de dressagem (a_d)	12	μm
Largura de dressagem (b_d)	0,6	mm
Velocidade de corte (v_c)	30	m/s
Velocidade de rotação – peça (n_w)	132	rpm
Velocidade de avanço – mergulho v_f	0,180	mm/min
Tempo de faiscamento – <i>spark-out</i>	4	s
Número de senos por volta	1, 3, 9, 12 e 17	-
Diâmetro do reboło (d_s)	455	mm
Diâmetro final peça (d_w)	50	mm

As duas condições iniciais, 1 e 3 ciclos de onda seno por volta do reboło, não apresentaram influência de restrição de resposta do atuador. Entretanto, a texturização da peça durante a retificação teve alteração do perfil inscrito com reboło texturizado com 3 ciclos por volta.

A Figura 5-7 apresenta o resultado obtido no simulador do processo de texturização para inscrição de 1 ciclo por volta. O perfil associado à restrição de contato (linha vermelha), a restrição de atuação (linha verde) e a textura projetada (linha laranja pontilhada) estão sobrepostos no gráfico de amplitude (μm) *versus* posicionamento circunferencial. Esta

indicação representa a avaliação de nenhuma influência significativa associada às restrições levantadas.

Figura 5-7 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 1 ciclo por volta do rebolo

Fonte: Produção do próprio autor.

A baixa amplitude de deslocamento do dressador ($12\mu\text{m}$) e a também baixa frequência de atuação (21Hz) não proporcionaram influência sobre o processo, por esse motivo todas as curvas da Figura 5-7 estão sobre postas. Este resultado pode ser observado na previsão do simulador e também na circularidade da peça, descritas na Figura 5-8. A medição descreve mesmo perfil e amplitude da textura desejada, 10 ciclos sinusoidais por volta da peça e amplitude de $12\mu\text{m}$.

Figura 5-8 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 1 ciclo por volta do rebolo e relação de rotação 10

Fonte: Produção do próprio autor.

A influência da restrição de contato apresenta alteração do perfil inscrito na avaliação com 3 ciclos por volta do rebolo. Este resultado está representado na Figura 5-9. Pequena alteração pôde ser calculada pelo simulador, não visual devido a forma da variação ser segundo contato circular. A medição do perfil na peça apresentou as mesmas características, com amplitude também sem alteração e pouca influência do perfil. O resultado da circularidade está representado no gráfico ilustrado na Figura 5-10.

Figura 5-9 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 3 ciclos por volta do rebolo

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5-10 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 3 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10

Fonte: Produção do próprio autor.

A influência das duas restrições no perfil final capaz de ser reproduzido passa a fazer efeito com o aumento dos ciclos por volta. A inclusão de 6 ciclos senoidais por volta do rebolo teve redução de amplitude ocasionado pela restrição de resposta do atuador (10μm). O perfil da

textura inscrita teve forma com inclinações distintas ao inscrito no rebolo. Estas avaliações estão representadas nas projeções calculadas pelo simulador, ilustrada na Figura 5-11.

Figura 5-11 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 6 ciclos por volta do rebolo

Fonte: Produção do próprio autor.

O perfil da textura medido na peça mostrou que a amplitude das texturas teve redução segundo o valor esperado. Esta análise está descrita no resultado de circularidade ilustrado na Figura 5-12.

Figura 5-12 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 6 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10

Fonte: Produção do próprio autor.

Os efeitos das restrições são representativos apenas nas condições de texturização com frequências superiores. A experimentação com 9, 12 e 17 ciclos evidencia a influência da geometria do contato trocoidal. As formas obtidas na peça possuem perfil deformado devido à trajetória dos grãos terem comprimento superior à alteração de distância na profundidade descrita pela textura. A região interior da textura na peça possui forma determinada por este arco, enquanto a região externa é resultado da junção de trajetórias. Como resultado, a geometria exterior da textura possui forma de cunha, distinto a forma curvilínea que seria esperado para uma onda seno. A medição da circularidade apresenta os mesmos resultados, com evidências a atenuação da profundidade e a forma.

Os resultados com inscrição de 9 ciclos por volta estão representados na Figura 5-13 – simulação e Figura 5-14 – circularidade.

Figura 5-13 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 9 ciclos por volta do rebolo

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5-14 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 9 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10

Fonte: Produção do próprio autor.

A avaliação da inscrição com 12 ciclos por volta evidência o limite da metodologia de análise adotada. O comprimento da textura (aprox. 1,4mm) possui valor muito próximo ao diâmetro da esfera de contato do instrumento de medição (2mm). Este efeito causa medição de rugosidade junto da variação da textura. Assim, é possível confirmar a avaliação do simulador quanto a restrição de atuação e contato, porém a geometria interna da textura não foi possível de ser comparada. As análises deste experimento estão representadas nas Figura 5-15 e Figura 5-16.

Figura 5-15 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 12 ciclos por volta do rebolo.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5-16 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 12 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10.

Fonte: Produção do próprio autor.

A texturização com 17 ciclos de onda senoidal por volta do rebolo evidencia o limite do contato particular da retificação. Nesta condição, o comprimento circunferencial da textura possui valor próximo ao arco de contato crítico da texturização, sendo praticamente transcrita somente a forma deste arco. Esta análise é observada segundo o perfil parametrizado pelo produzido pelo simulador da texturização. Somente foram transcritas as regiões interiores da textura, região produzida pelos maiores valores diametrais do rebolo. A região exterior teve forma praticamente inexistente, como resultado das trajetórias maiores possuírem valores iguais de comprimento. A Figura 5-17 apresenta esta análise, com destaque a amplitude esperada – metade do valor inscrito no rebolo.

Figura 5-17 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil senoidal, 17 ciclos por volta do rebolo

Fonte: Produção do próprio autor.

A análise de circularidade para esta texturização não possui representatividade para comparação dos resultados. O comprimento circunferencial da textura possui dimensão inferior ao da textura (aprox. 1mm) e amplitude muito próxima a valores de rugosidade, comprometendo a análise. Esta evidência está representada na medição ilustrada na Figura 5-18.

Figura 5-18 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, textura senoidal produzida com 17 ciclos por volta do rebolo e relação de rotação 10

Fonte: Produção do próprio autor.

Os experimentos conduzidos com a inscrições senoidal comprovaram a capacidade e eficácia dos sistemas de simulação desenvolvidos para a análise do processo de texturização. As restrições de atuação e contato foram visualizadas de maneira isolada e combinada nas condições propostas, sendo o modelo de contato capaz de avaliar e prever a textura obtida na peça. Isso posto, o experimento nas condições para a texturização das microrampas foi realizado para validação do processo completo.

A validação experimental de todo o sistema para texturização com processo de retificação foi conduzida com a reprodução de um perfil de microrampa. Foi escolhido o perfil com a maior relação de inclinação – 1:9. Espera-se nesta condição observar a restrição geométrica ocasionada pelo contato durante a retificação e também atenuação da amplitude devido o limite de resposta. A microrampa foi inscrita somente na metade do comprimento do rebolo, de forma a construir uma área de patamar – sem textura. Este requisito está associado à

aplicação, que requer percentual de área de contato do mancal sem a inclusão das texturas. No Quadro 5-3 as condições do experimento estão representadas.

Quadro 5-3 - Parâmetros de texturização para avaliação de resposta - microrampa

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade angular do rebolo (n_s)	1600	rpm
Velocidade de dressagem (v_d)	160	mm/min
Amplitude do sinal de atuação	1,5	Volt
Deslocamento linear esperado do dressador	0 a -18	μm
Frequências parametrizadas dos segmentos da microrampa	14,8 e 133	Hz
Profundidade de dressagem (a_d)	12	μm
Largura de dressagem (b_d)	0,6	mm
Velocidade de corte (v_c)	30	m/s
Velocidade de rotação – peça (n_w)	40	rpm
Velocidade de avanço – mergulho v_f	0,180	mm/min
Tempo de faiscamento – <i>spark-out</i>	4	s
Número de microrampas por volta do rebolo	1	-
Diâmetro do rebolo (d_s)	455	mm
Diâmetro final peça (d_w)	50	mm

O cálculo das frequências parametrizadas dos segmentos da microrampa é determinado pela aproximação por 1/4 de ciclo senoidal – método de análise proposto (Capítulo 4, seção 4.3). A velocidade de rotação do rebolo fornece a frequência determinante para inscrição de um ciclo completo de onda senoidal na volta. Na aplicação com patamar (área sem textura), compreendendo metade do comprimento do rebolo, a frequência de resposta deve ser o dobro. Este valor do processo é utilizado para cálculo das frequências determinantes:

$$f_{max} = f_{saída} = 2 \times \frac{n_s}{p_s \times 4 \times 60}, \quad (5.1)$$

$$f_{entrada} = 2 \times \frac{n_s}{p_e \times 4 \times 60}, \quad (5.2)$$

$$A_{max} = h_k, \quad (5.3)$$

onde: p_e – proporção do segmento de saída (10%); p_s – proporção do segmento de entrada (90%); f_{max} – máxima frequência de geração da textura (Hz); A_{max} – máxima amplitude de geração da textura (μm); h_k – profundidade da textura (μm).

Os resultados da simulação da texturização estão descritos no gráfico representado na Figura 5-19. A curva do perfil desejado representa a parametrização adotada para a microrampa, relação 1:9 e amplitude de $12\mu\text{m}$. Esta curva de solicitação foi utilizada pelo simulador para projeção do real deslocamento associado à restrição de resposta do conjunto dressador dinâmico, $v_{\max(1V)} = 1.200 \mu\text{m/s}$ (para a amplitude programada de 1V). Desta forma, foi corrigido o valor de amplitude para 1,5V, velocidade adequada para o processo. O resultado desta limitação foi associado às dimensões do rebolo e da peça para cálculo da restrição de contato.

Figura 5-19 - Análise das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40

Fonte: Produção do próprio autor.

A inscrição na peça está representada na medição de circularidade - Figura 5-20. A identificação da restrição de resposta do atuador não era esperada de influenciar a profundidade da textura, fato também observado na medição das peças. O perfil resultante indica a principal restrição neste processo, com alteração da proporção entre as inclinações e alteração da

geometria final. A visualização deste resultado está melhor representada na medição de circularidade descrita no gráfico linear, com medição de somente um perfil. Esta medição está ilustrada na Figura 5-21.

Figura 5-20 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5-22 - Análise comparativa do perfil desejado (ou programado), simulado e obtido; perfil microrampa - relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40

Fonte: Produção do próprio autor.

Esta validação experimental comprovou a funcionalidade dos sistemas propostos para predição e análise do processo de texturização, ferramentas importantes para capacitar o processo frente às restrições que foram determinadas. Outros experimentos foram propostos para verificação segundo parametrização variada das microrampas. Estes experimentos estão descritos na seção 5.3 e forneceram a comprovação de funcionalidade de toda a metodologia proposta.

5.3 Avaliação experimental da texturização de microrampas com o processo de retificação

A avaliação experimental do sistema desenvolvido foi executada para simulação do processo de texturização. Os testes foram propostos com o objetivo de determinar a capacidade dos sistemas em prever o comportamento e fornecer os dados utilizados na programação da texturização. As alterações propostas têm objetivo de avaliação do processo apenas, não representam detalhes técnicos associados à uma aplicação específica.

O sistema de simulação foi utilizado para previsão da correlação dos seguintes parâmetros de texturização: profundidade da textura, relação de velocidade de rotação (R) e número de texturas inscritas na periferia da peça. Estes experimentos forneceram a base necessária quando se busca discussão sobre a capacidade do processo de retificação. O caráter

inovador desta técnica delimitava o planejamento a experiências intrínsecas apenas, sendo a experimentação a única forma de previsão do processo. Com o sistema de simulação aqui desenvolvido, é possível prever os dados baseados nos modelos para a proposição das futuras aplicações.

O número de texturas inscritas por volta do rebolo está limitado pela capacidade de resposta do dressador dinâmico e a velocidade de rotação da peça. O número maior de texturas demanda maior velocidade de deslocamento linear no atuador, devido ao tempo de cada inscrição ser menor. De forma inversa, nesses casos a velocidade de rotação da peça deve ser maior para que o mesmo número de texturas por volta seja inscrito na peça. Ambos valores são proporcionais ao número de inscrições no rebolo, sendo o caráter de seleção desta combinação o aprimoramento da usinagem com retificação. Assim, a validação desta combinação foi conduzida ao texturizar sempre o mesmo número de inscrições por volta na peça, mas alterando a relação de rotação e as texturas no rebolo para verificação.

O experimento utilizado para calibração do modelo (Capítulo 5, seção 5.2) foi selecionado como referência para proposição das alterações. No teste de calibração foram inscritas 40 microrampas por volta da peça, adotando a relação de 1 textura por volta no rebolo e, conseqüentemente, relação entre as velocidades de rotação (R) igual a 40. A variação da calibração experimentada foi selecionada para inscrição de 2 e 4 microrampas por volta do rebolo. Estas condições afetam o processo ao induzir condição de corte diferenciada, além de aproximar aos limites operacionais do atuador e da retificadora CNC utilizada.

A inscrição de 2 e 4 microrampas por volta no rebolo, com relação de inclinação de 1:9, demanda do atuador velocidade de resposta associada a restrição de tempo que este movimento está sujeito. O cálculo para determinar a velocidade requisitada se baseia no tempo crítico da maior inclinação da textura, sendo obtida pela divisão do perímetro do rebolo segundo a relação entre o número de texturas e a relação de inclinação:

$$v_{max} = h_k \times f_{max}, \quad (5.4)$$

onde: h_k – profundidade da textura (μm); f_{max} – máxima frequência para a texturização; v_{max} – velocidade requisitada de deslocamento linear do dressador ($\mu\text{m/s}$).

A velocidade máxima de deslocamento que foi obtida no ensaio de resposta em frequência foi de $v_{\max(1V)} = 1.200 \mu m/s$, limitada à máxima amplificação que o módulo de potência do piezo-atuador é capaz de reproduzir. O modelo utilizado na construção do dressador dinâmico limita a amplificação a 10 vezes o valor de entrada, assim a velocidade máxima está condicionada à mesma relação - $v_{\max(10V)} = 12.000 \mu m/s$. Este limite do amplificador não foi atingido com as condições propostas, sendo apenas referência para evitar sobrecarga do sistema.

A correção da amplitude do sinal de atuação é determinada baseada no levantamento da velocidade demandada. A relação entre a velocidade de deslocamento ($v_{\max}$) e a velocidade máxima do atuador determina a amplificação que deve ser induzida no sinal para que a textura inscrita no rebolo possua a profundidade demandada. Esta correção e os parâmetros de operação do processo de texturização estão descritos no Quadro 5-4.

Quadro 5-4 - Parâmetros de operação para a texturização com 2 e 4 microampas (relação 1:9)

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade de rotação - rebolo (n_s)	1300	rpm
Velocidade de dressagem (v_d)	130	mm/min
Amplitude do sinal de atuação	2 e 4	Volt
Deslocamento linear esperado do dressador	0 a -12	μm
Frequência crítica da microrampa	216 e 433	Hz
Profundidade de dressagem (a_d)	12	μm
Largura de dressagem (b_d)	0,6	mm
Velocidade de corte (v_c)	30	m/s
Velocidade de rotação – peça (n_w)	65 e 130	rpm
Velocidade de avanço – mergulho v_f	0,180	mm/min
Tempo de faiscamento – <i>spark-out</i>	4	s
Número de microrampas por volta do rebolo	2 e 4	-
Diâmetro do rebolo (d_s)	455	mm
Diâmetro final peça (d_w)	50	mm

A simulação da texturização com 2 microrampas por volta do rebolo e a relação de rotação (R) igual a 20 está ilustrada na Figura 5-23. Foram utilizados os parâmetros do Quadro 5-4 para composição da simulação.

Figura 5-23 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 2 por volta do rebolo e relação de rotação 20

Fonte: Produção do próprio autor.

A medição da textura inscrita na peça foi realizada com a mesma metodologia adotada nos ensaios preliminares. O gráfico da circularidade foi utilizado como referência para comparação da simulação com o resultado obtido na peça. Esta medição está representada na Figura 5-24, com o gráfico polar da circularidade.

Figura 5-24 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 2 por volta do rebolo e relação de rotação 20

Fonte: Produção do próprio autor.

A experimentação desta condição aponta que não houve influência significativa do número de microrampas por volta do rebolo no perfil inscrito. A textura teve profundidade de 12µm, conforme determinado com o ajuste de amplificação para 2V no sinal de atuação. Este mesmo resultado foi obtido com a condição de 4 microrampas por volta do rebolo. Estes resultados estão representados nas Figura 5-25 e Figura 5-26.

Figura 5-25 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 4 por volta do rebolo e relação de rotação 10

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5-26 - Medição de circularidade para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 4 por volta do rebolo e relação de rotação 10

Fonte: Produção do próprio autor.

Os experimentos com 2 e 4 microrampas por volta do rebolo forneceram a parametrização necessária para associação do processo de texturização com a retificação. O número de texturas inscrito na peça pôde ser mantido, mesmo com condições de velocidades

de rotação distintas. Assim, a limitação geométrica do contato foi mantida e somente a limitação do atuador causou influência. Esta relação foi possível de ser observada e, a aproximação adotada baseada na velocidade de resposta, apresentou resultado adequado.

A experimentação foi complementada com a avaliação preditiva do modelo de contato na determinação da relação entre o perfil inscrito na peça e a relação de velocidades de rotação (R). O perfil inscrito depende do arco de contato formado pelos grãos abrasivos, sendo a velocidade relativa entre o rebolo e a peça a condição de restrição deste arco. Quanto maior o arco de contato de cada grão, mais pronunciado será o efeito do contato circular. Esta análise pode ser inferida com o equacionamento de trajetória (Capítulo 3, seção 3.2), porém a previsibilidade deve fornecer a qualificação da geometria interna. As dimensões devem ser previstas pelo simulador de forma a conduzir a análise prévia.

A comprovação experimental desta previsibilidade foi atendida com a experimentação de texturas transcritas à peça em condições diferentes de relação de rotação. A proposição dos testes foi também parametrizada com o perfil de microrampas, selecionando duas condições comparativas de relação de rotação: 20 e 40. Somente uma textura foi inscrita no rebolo, para análise do perfil segundo a condição desejada: 1:9 de relação entre as inclinações internas da microrampa. Os parâmetros do processo de texturização estão descritos no Quadro 5-5.

Quadro 5-5 - Parâmetros de operação para a texturização com 1 microrampa (relação 1:9)

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade de rotação - rebolo (n_s)	1360	rpm
Velocidade de dressagem (v_d)	136	mm/min
Amplitude do sinal de atuação	1	Volt
Deslocamento linear esperado do dressador	0 a -12	μm
Frequência crítica da microrampa	56	Hz
Profundidade de dressagem (a_d)	12	μm
Largura de dressagem (b_d)	0,6	mm
Velocidade de corte (v_c)	30	m/s
Velocidade de rotação – peça (n_w)	68 e 34	rpm
Velocidade de avanço – mergulho v_f	0,180	mm/min
Tempo de faiscamento – <i>spark-out</i>	4	s
Número de microrampas por volta do rebolo	1	-
Diâmetro do rebolo (d_s)	455	mm
Diâmetro final peça (d_w)	50	mm

A simulação do perfil obtido com a inscrição de 20 microrampas na superfície da peça está ilustrada na Figura 5-27. A trajetória dos grãos durante a retificação é representada por arco similar ao perfil interno da textura, o que proporciona a capacidade de reprodução da relação 1:9 na peça. O arredondamento não influi representativamente o perfil, fato devido à dimensão da textura ser superior a este efeito. Esta avaliação pode ser observada pela aproximação da curva de atuação com a de contato (curvas verde e vermelha - Figura 5-27).

Figura 5-27 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 20

Fonte: Produção do próprio autor.

O arco de contato, devido à cinemática trocoidal, teve pouca influência no perfil analisado na circularidade da peça após a retificação. A proporção das inclinações foi mantida, bem como a profundidade. Foi escolhido não incluir nesta textura uma região plana, para evidenciar a intersecção da curva de contato com o perfil obtido. Esta análise é importante para descrever as medidas finais da textura, avaliação requisitada quando o objetivo é obter o perfil distribuído na peça sem regiões intermediárias. A medição do perfil inscrito na peça está representada no gráfico de circularidade linear, com ampliação para análise de uma microrampa. Este resultado está ilustrado na Figura 5-28.

Figura 5-28 - Medição de circularidade linear para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 20

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados obtidos com a inscrição de 20 microrampas por volta, quando comparados à inscrição de 40, apresentam a limitação do processo referente ao perfil capaz de ser reproduzido. Esta análise está confirmada ao comparar os resultados de simulação e medição da peça com 40 texturas, representados nas Figura 5-29 e Figura 5-30.

Figura 5-29 - Simulação das restrições do processo de texturização com perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5-30 - Medição de circularidade linear para avaliação do perfil inscrito, perfil microrampa – relação 1:9, 1 por volta do rebolo e relação de rotação 40

Fonte: Produção do próprio autor.

Nesta análise, somente foi possível reproduzir o perfil inscrito na peça com aumento do comprimento das texturas. Este efeito é indesejado quando se objetiva a produção de canais para aprimoramento de mancais hidrodinâmicos, dado que a melhoria funcional do mancal depende desta forma.

As análises e discussões conduzidas nos experimentos propostos comprovam a capacidade de avaliação prévia da texturização, além de proposição dos parâmetros limitadores. Assim, o *trade-off* de design ao projetar superfícies funcionais pode ser desenvolvido de forma a buscar a melhor combinação de restrição da texturização com retificação e o perfil com melhor desempenho hidrodinâmico.

Os experimentos realizados comprovaram o atendimento das restrições da texturização com as funções desdobradas nos sistemas produzidos. Foram realizados testes também em equipamentos de produção. Os resultados dessas aplicações em ambiente industrial não estão descritos nesta tese devido à propriedade intelectual envolvida com os processos do parceiro industrial. Entretanto, a funcionalidade foi possível de ser comprovada nos experimentos

conduzidos em laboratório. Espera-se que trabalhos futuros sejam conduzidos com o processo de texturização com retificação para validação da metodologia na produção de outras texturas. Nesta tese este objetivo de continuidade é possível graças ao detalhamento de todos os sistemas e métodos empregados.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho representa a continuidade das pesquisas desenvolvidas pelo grupo do LAPRAS no tema engenharia de superfícies. A experimentação para a comprovação da proposta de texturização com o processo de retificação teve início com a proposição de projeto de iniciação científica, estabelecido em 2007 entre o orientador e o aluno. Desde tal fase inicial, o processo foi sendo aprimorado para atender os requisitos restritos quando se objetiva a aplicação da pesquisa. Os resultados apresentados nesta tese solidificam esta evolução, com a proposição final de um sistema de simulação alinhado às funções e características para a aplicação na fabricação de virabrequins.

O processo de texturização com rebolos foi revisado para incluir em suas características os controles necessários para a produção de superfícies customizadas de mancais hidrodinâmicos com texturas constituídas de perfis interpolados. Um novo sistema de atuação foi desenvolvido baseado nas restrições de resposta para a texturização de microrampas, particular textura de interesse. O dressador dinâmico construído foi detalhado nas seções anteriores, sendo a metodologia adotada a principal contribuição para os futuros trabalhos na área. A avaliação do real desempenho do atuador com o sistema de mapeamento por emissão acústica aprimorou a análise, fator determinante para o sucesso deste trabalho.

O sistema de controle do processo teve reconstrução de suas funcionalidades frente as novas bibliotecas de comunicação disponíveis para os processadores modernos, de forma que a sincronização angular e longitudinal da texturização do rebolo tivesse aprimoramento para eliminar os problemas do sistema anterior. Em complemento, o novo sistema apresenta as funcionalidades requisitadas para futuros trabalhos no tema. A capacidade de produção das texturas baseadas em modelos matemáticos e figuras possibilita que especialistas na aplicação sejam capazes de utilizar o método de texturização, sem necessidade de domínio na modelagem do processo de dressagem e retificação. A ferramenta proposta permite ampliar a aplicação da texturização com retificação para outras proposições, além da avaliada neste trabalho.

Por fim, complementar ao processo de execução, o sistema de simulação da texturização compreende uma ferramenta de análise também inovadora e validada. Os estudos nesta área passam agora por avaliação com um modelo robusto para previsão do perfil capaz de ser reproduzido com a retificação cilíndrica de mergulho. Tal ferramenta computacional permite, assim, fornecer a preparação do processo e orientar as discussões para seleção dos parâmetros

operacionais e resultados esperados. Em complemento, a simulação pode ser adotada para proposição de texturas que objetivem o aprimoramento da Retificação em si, não a texturização. Função também associada a metodologia, porém não conduzida nas análises devido objetivo ser a reprodução dos perfis. Esta função está evidenciada na revisão conduzida por Li; Axinte (2016) sobre as metodologias de texturização aplicadas a retificação, futuras aplicações que podem ser conduzidas.

A tese proposta inicialmente de utilização do processo de texturização de rebolos para a construção das microrampas foi comprovada com os resultados obtidos. O sistema de texturização desenvolvido foi capaz de produzir as texturas com a profundidade na escala desejada (até 24 μ m), com controle previsível pelo simulador desenvolvido e repetitivo ao longo dos testes realizados. O módulo de dressagem dinâmica produzido foi testado em duas retificadoras cilíndricas, em ambientes acadêmicos e de produção. Ambos testes demonstraram a capacidade de texturização com o módulo integrado a máquina. Função que atende a tese de reprodução dos resultados com apenas a adaptação de uma retificadora com o módulo de dressagem.

Estes objetivos completam a sequência de trabalho associada ao desenvolvimento tecnológico de um processo inovador. Adotando como referência o modelo de classificação de maturidade tecnológica proposta pela NASA - *Technology Readiness Level* (TRL), os trabalhos sequencias da texturização buscaram galgar os níveis em busca da aplicação e transferência de conhecimento.

O nível inicial, escala 1 de TRL, estabelecido pela pesquisa exploratória foi apresentado a comunidade internacional com a primeira publicação de trabalho nos *Annals of CIRP* - (OLIVEIRA; BOTTENE; FRANÇA, 2010). As discussões desde então motivaram a continuidade do desenvolvimento, com a proposição das condições para controle superficial que foram apresentadas na segunda publicação - (SILVA et al., 2013). Neste estágio, a maturidade da pesquisa foi destacada pelo parceiro industrial, sendo então proposto os novos objetivos para alcançar os níveis de maturidade mínimos para uma aplicação robusta (4 e 5 na escala TRL).

A texturização com retificação foi comprovada viável com o uso dos sistemas desenvolvidos. O processo foi capaz de atender requisitos de qualidade na ótica referente ao processo de retificação e também texturização. A formalização destes resultados de sucesso foi

apresentada no artigo final, publicado no mesmo periódico. A sequência das publicações foi incluída nesta tese, para sustentar a discussão e produção de trabalhos futuros (Anexo A).

Os resultados atingidos solidificam o avanço ao estágio de maturidade prévia a subsistema, com as funções já definidas e as condições de contorno já foram experimentalmente validadas (estágio 4 na escala TRL). Resultado que atende ao objetivo proposto para este doutorado e fornece as informações para a continuidade da aplicação em ambiente industrial.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-AAL, H. A. Functional surfaces for tribological applications: Inspiration and design. **Surface Topography: Metrology and Properties**, v. 4, n. 4, 2016.

AMPLIFIER, H. P.; RECOVERY, E. PZ170E User Manual E-481 High-Performance Piezo Amplifier / Controller. 2013.

ATABANI, A. E.; BADRUDDIN, I. A.; MEKHILEF, S.; SILITONGA, A. S. A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4586–4610, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.092>>.

AURICH, J. C.; ENGMANN, J.; SCHUELER, G. M.; HABERLAND, R. Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials. **CIRP Annals**, v. 58, n. 1, p. 311–314, 1 jan. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609000924>>.

BHADURI, D.; BATAL, A.; DIMOV, S. S.; ZHANG, Z.; DONG, H.; FALLQVIST, M.; M'SAOUBI, R. On Design and Tribological Behaviour of Laser Textured Surfaces. **Procedia CIRP**, v. 60, p. 20–25, 1 jan. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117302858?via%3Dihub>>.

BORGHI, a.; GUALTIERI, E.; MARCHETTO, D.; MORETTI, L.; VALERI, S. Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications. **Wear**, v. 265, n. 7–8, p. 1046–1051, 2008.

BOTTENE, A. C. **Método Inovador para Texturização de Rebolos**. 2012. Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-27022013-132909/>>.

BRINKSMEIER, E.; MUTLUGÜNES, Y.; KLOCKE, F.; AURICH, J. C.; SHORE, P.; OHMORI, H. Ultra-precision grinding. **CIRP Annals**, v. 59, n. 2, p. 652–671, 1 jan. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610001885?via%3Dihub>>.

BROWN, S.; PYKE, D.; STEENHOF, P. Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3797–3806, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.059>>.

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L. Functional Characterization of Structured Surfaces for Tribological Applications. **Procedia CIRP**, v. 12, p. 456–461, 2013.

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L. Engineered surfaces for lubricated friction: A new characterization approach for sliding surfaces. **CIRP Annals**, v. 66, n. 1, p. 551–554, 1 jan. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785061730077X?via%3Dihub>>.

BRUZZONE, a. a G.; COSTA, H. L.; LONARDO, P. M.; LUCCA, D. a. Advances in

engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 750–769, 2008.

BUSCAGLIA, G. C.; CIUPERCA, I.; JAI, M. On the optimization of surface textures for lubricated contacts. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, v. 335, n. 2, p. 1309–1327, 2007.

BYUN, J. W.; SHIN, H. S.; KWON, M. H.; KIM, B. H.; CHU, C. N. Surface texturing by micro ECM for friction reduction. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 11, n. 5, p. 747–753, 1 out. 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12541-010-0088-y>>.

CHEN, X.; QU, N.; LI, H.; XU, Z. Pulsed electrochemical micromachining for generating micro-dimple arrays on a cylindrical surface with a flexible mask. **Applied Surface Science**, v. 343, p. 141–147, 15 jul. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433215006728?via%3Dihub>>.

COBLAS, D. G.; FATU, A.; MAOUI, A.; HAJJAM, M. **Manufacturing textured surfaces: State of art and recent developments** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* SAGE Publications Sage UK: London, England, 10 jan. 2015. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1350650114542242>>.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. **Tribology International**, v. 40, n. 8, p. 1227–1238, 2007.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Development of a maskless electrochemical texturing method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, p. 3869–3878, 21 abr. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608006730?via%3Dihub>>.

DENKENA, B.; BOEHNKE, D.; KÄSTNER, J. Microstructuring of functional surfaces by means of cutting processes. **Production Engineering**, v. 2, n. 1, p. 21–25, 2008.

DENKENA, B.; BOEHNKE, D.; SPILLE, C.; DRAGON, R. In-process information storage on surfaces by turning operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 85–88, 2008.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; WANG, B. Manufacturing of functional riblet structures by profile grinding. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 14–26, 2010.

ETSION, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 1, p. 248, 1 jan. 2005. Disponível em: <<http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1467274>>.

ETSION, I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication. **Friction**, v. 1, n. 3, p. 195–209, 2013a. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40544-013-0018-y>>.

EVANS, C. J.; BRYAN, J. B. “Structured”, “Textured” or “Engineered” Surfaces. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 48, n. 2, p. 541–556, jan. 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607632338>>.

FANG, F. Z.; ZHANG, X. D.; WECKENMANN, A.; ZHANG, G. X.; EVANS, C.

Manufacturing and measurement of freeform optics. **CIRP Annals**, v. 62, n. 2, p. 823–846, 1 jan. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850613001935?via%3Dihub>>.

GACHOT, C.; ROSENKRANZ, A.; HSU, S. M.; COSTA, H. L. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. **Wear**, v. 372, p. 21–41, 2017.

GANDHI, R.; SEBASTIAN, D.; BASU, S.; MANN, J. B.; IGLESIAS, P.; SALDANA, C. Surfaces by vibration/modulation-assisted texturing for tribological applications. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 1–4, p. 909–920, 2016.

GRAHAM, E.; PARK, C. I.; PARK, S. S. Fabrication of micro-dimpled surfaces through micro ball end milling. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 14, n. 9, p. 1637–1646, 2013.

GROPPER, D.; WANG, L.; HARVEY, T. J. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. **Tribology International**, v. 94, p. 509–529, 2016.

GUO, P.; LU, Y.; PEI, P.; EHMANN, K. F. Fast Generation of Micro-Channels on Cylindrical Surfaces by Elliptical Vibration Texturing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 136, n. 4, p. 41008, 21 maio 2014. Disponível em: <<http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4027126>>.

HASHIMOTO, F.; CHAUDHARI, R. G.; MELKOTE, S. N. Characteristics and Performance of Surfaces Created by Various Finishing Methods (Invited Paper). **Procedia CIRP**, v. 45, p. 1–6, 1 jan. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116003346?via%3Dihub>>.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221–234, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.022>>.

KANGO, S.; SINGH, D.; SHARMA, R. K. Numerical investigation on the influence of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing. **Meccanica**, v. 47, n. 2, p. 469–482, 5 fev. 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11012-011-9460-y>>.

KIM, H.-C.; KO, T. J. Verification of simulation of surface texturing on planar surface by grinding. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 16, n. 2, p. 225–231, 6 fev. 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12541-015-0030-4>>.

KIM, J.; LEE, S.-K. Micro-patterning technique using a rotating cutting tool controlled by an electromagnetic actuator. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 101, p. 52–64, 1 fev. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695515300869?via%3Dihub>>.

KURNIAWAN, R.; KISWANTO, G.; KO, T. J. Micro-dimple pattern process and orthogonal cutting force analysis of elliptical vibration texturing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 106, p. 127–140, 2016.

LI, H. N.; AXINTE, D. Textured grinding wheels: A review. **International Journal of**

Machine Tools and Manufacture, v. 109, p. 8–35, 2016.

LI, Z.; FANG, F.; ZHANG, X.; LIU, X.; GAO, H. Highly efficient machining of non-circular freeform optics using fast tool servo assisted ultra-precision turning. **Optics Express**, v. 25, n. 21, p. 31072–31081, 2017.

MALKIN, S.; GUO, C. Cutting Path. In: **Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives**. [s.l.] Industrial Press Inc., 2008. p. 47–53.

MORONUKI, N. Functional texture design and texturing processes. **International Journal of Automation Technology**, v. 10, n. 1, p. 4–15, 2016.

NANBU, T.; REN, N.; YASUDA, Y.; ZHU, D.; WANG, Q. J. Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. **Tribology Letters**, v. 29, n. 3, p. 241–252, 12 mar. 2008. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11249-008-9302-9>>.

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. 1, p. 361–364, 2010.

OLIVEIRA, J. F. G. De; DORNFELD, D. A. Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 217–220, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607621088>>.

PETTERSSON, U.; JACOBSON, S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors. **Tribology International**, v. 40, n. 2 SPEC. ISS., p. 355–359, 2007.

REAL, H.; SOON, H.; MUST, W.; NEXT, H. Focus The Comeback of the Electric Car ? **Focus**, p. 16, 2009. Disponível em: <<http://www.bcg.com/documents/file15404.pdf>>.

ROMM, J. The car and fuel of the future. **Energy Policy**, v. 34, n. 17, p. 2609–2614, 2006.

SILVA, E. J.; KIRSCH, B.; BOTTENE, A. C.; SIMON, A.; AURICH, J. C.; OLIVEIRA, J. F. G. Manufacturing of structured surfaces via grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 243, p. 170–183, 1 maio 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013616304526?via%3Dihub>>.

SILVA, E. J. Da; OLIVEIRA, J. F. G. De; SALLES, B. B.; CARDOSO, R. S.; REIS, V. R. A. Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1, p. 355–358, 2013.

SIMON, A. **Masterthesis Manufacturing of structured surfaces via grinding**. 2014. Institute for Manufacturing Technology and Production Systems Technical University of Kaiserslautern, 2014.

STEPIE, P. Deterministic and stochastic components of regular surface texture generated by a special grinding process. **Wear**, v. 271, n. 3–4, p. 514–518, 2011.

STEPIEŃ, P. Regular Surface Texture Generated by Special Grinding Process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 131, n. 1, p. 11015, 1 fev. 2009. Disponível em: <<http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1468485>>.

STEPIÉN, P.; SZAFARCZYK, M. Generation of Regular Patterns on Ground Surfaces. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 38, n. 1, p. 561–566, 1989.

VLĂDESCU, S. C.; OLVER, A. V.; PEGG, I. G.; REDDYHOFF, T. Combined friction and wear reduction in a reciprocating contact through laser surface texturing. **Wear**, v. 358–359, p. 51–61, 2016.

XU, S.; KURIYAGAWA, T.; SHIMADA, K.; MIZUTANI, M. Recent advances in ultrasonic-assisted machining for the fabrication of micro/nano-textured surfaces. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 12, n. 1, p. 33–45, 31 mar. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11465-017-0422-5>>.

ANEXO – ARTIGOS PUBLICADOS NO *ANNALS OF CIRP*

Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

CIRP Annals

A novel dressing technique for texturing of ground surfaces

J. F. G. Oliveira (1)^a, A. C. Bottene^b, T. V. França^b

^a - IPT – Institute for Technological Research of State of São Paulo, São Paulo, Brazil

^b - Nucleus for Advanced Manufacturing, University of São Paulo, São Carlos, Brazil

Abstract: This work presents a novel dressing technique that allows the inscription of pre-configurable patterns, or textures, on the grinding wheel surface. An electro-mechanical exciter connected to the dressing tool receives synchronized signal from a control software engraving patterns on the grinding wheel. The dressing and grinding operations were evaluated using the AE mapping technique. The presented applications show the use of textured grinding wheels for better grinding process performance in conventional applications and also for the production of patterned surfaces in order to change its functional performance. The results and analysis allow a better understanding of the grinding mechanism with patterned wheels. With the application of the proposed method it was possible to inscribe different patterns on workpieces and also to increase the grinding performance in conventional applications.

Keywords: Dressing, Grinding Wheel, Texturing

1. Introduction

1.1. Grinding control by means of dressing operations

A significant amount of research describes the influence of wheel topography on grinding process performance [1, 3]. König evaluated the dressing parameters and their effects in grinding on the wheel topography and grinding output [3].

The combination of the dressing depth (a_d), dressing velocity (v_d) and the dressing tool tip geometry determine the wheel topography – phenomenon denominated as macro-effect. It is possible to obtain the desirable wheel sharpness ensuring the best grinding performance by controlling these parameters. The problem with conventional dressing operations is the unpredictable change the dressing tool geometry can suffer. The tool tip wear is difficult to monitor due to its high dependence on various operational aspects. Because of this, the dressing parameters should be frequently corrected during the dressing tool life in order to achieve a fairly constant grinding output. Figure 1 presents a qualitative view of the typical wear of dressing tools represented by the variation of the contact width (b_d).

Figure 1. Typical wear of dressing tools – contact width (b_d).

Another method to control and improve grinding performance would be to manufacture engineered grinding wheels with the desirable topography to optimize the cutting process. One example are the so called grooved wheels. It was proved that the discontinuous grinding not only decreases the cutting power and surface damages but also optimizes the cutting fluid dynamics and the chip removal [4, 6]. Kim et al. and Lee et al. [5, 6] presented a practical study using grooved wheels to process difficult to grind materials (DTG), such as ceramic and aluminum alloys. As a result, grooved wheels proved to be suitable to improve the capability of the grinding processes.

However, these researches pointed a major technical difficulty for their practical use. The associated costs and the time necessary for setting up

the grooved wheel make the method not viable for most production purposes.

1.2. Grinding wheel texturing – a new approach for dressing operations

One way to overcome these technical problems and increase the control level of grinding process is by using textured tools. Similar methods are being researched for defined geometry machining process, such as turning, drilling and milling [7]; but have never being used in grinding. The main challenge is to obtain a good cost-efficiency methodology able to generate textures on the grinding wheel surface.

Figure 2. Surface groove geometry for the optimization of axial bearings [9].

Moreover the adoption of textured cutting tools may allow the development of engineered component surfaces contributing to increase its functional performance [8]. One example is the construction of grooved surfaces for hydrodynamic bearings. These engineered patterns have the objective to increase the bearing dynamic stability and also load capacity. Figure 2 shows surface grooving designs developed for axial bearings [9].

This work presents a novel dressing methodology that easily allows the production of pre-configurable patterns, or textures, on the grinding wheel surface for both applications of production of patterned pieces and to improve conventional grinding. It can be implemented in any CNC cylindrical grinding machine at low costs and without significant changes in the usual cycle times. In addition, the textured wheel can be applied to optimize the grinding process or transfer geometrical pattern to the ground component in order to improve its functional performance.

2. Proposed wheel texturing methodology

The proposed methodology is based on the introduction of a controlled external excitation in the dressing tool to dynamically change the dressing depth (a_d) during the dressing operation. It is possible to inscribe micro-patterns on the wheel surface by controlling the dressing velocity (v_d) and the grinding wheel angular position. Figure 3 presents the proposed method.

Figure 3. Methodology for the grinding wheel texturing.

The operation of this system can be divided in three main steps. First, the desired surface geometry is defined using the *Pattern Generation and Mapping Software*. The software allows the pattern definition and generates the excitation signals (bandwidth between 50 and 200 Hz) for each wheel rotation based on the dressing parameters, especially: b_d (diamond width), v_s (wheel speed) and U_d (overlap ratio); to be selected in the software interface. This allows the production of 8 patterns of any regular geometrical shape (square, diamond, grooved) per wheel rotation resulting pattern sizes of about 2mm in the part in the circumferential direction by 0.5 mm in the axial direction. The minimum size in the axial direction will be obviously limited by the diamond dresser width b_d .

The second part is carried out during the dressing operation. The software acquires the wheel angular position and generates the signal that will be amplified and send to the actuator to change the a_d during the dressing process. An electro-mechanical actuator was used as the excitation source due to its low cost and good frequency response. The equipment is suitable for low and high frequency operation and can be fixed outside the grinding machine, preserving its original structure and stiffness, so the patterning can be performed at regular wheel speeds of 45 m/s. The third part consists of the grinding process with the textured wheel. For the production of patterned pieces, the part angular position needs to be synchronized with the wheel, in order to achieve the exact transcription of the pattern. Figure 4 represents the kinematic of the grinding process with a textured grinding wheel.

Figure 4. Kinematic of the grinding process with a textured wheel.

Acoustic mapping was used for process monitoring and control. The map represents the AE distribution around the grinding wheel along the time axis, according to the method proposed by Oliveira and Dornfeld [10,11]. The technique allows the monitoring of the contact between the wheel and the dressing tool, during the dressing/texturing process making possible the visualization of the produced patterns in real-time.

In order to grind the patterns on the workpiece surface it is important to realize two aspects:

- The workpiece patterns will be scaled in the circumferential direction by the angular speed ratio between wheel and part.
- There should be synchronization between both wheel and workpiece during grinding.

The last aspect will be further analysed since the results show the possibility of a self-synchronization condition that would not require the wheel position control during grinding.

3. Results

3.1. Self-synchronization between wheel and workpiece

Tests were carried out to evaluate the possibility of self-synchronization between wheel and part during the pattern generation grinding process. This would allow the application of the system with much simpler controls and at lower investments on changes to the machine. For that, the grinding tests were carried out without any control of the wheel angular position. An integer value was selected for the rotational ratio (ratio between the grinding wheel and workpiece angular speeds, represented here by the R parameter). Its value was kept constant in the CNC along the whole grinding cycle. A good pattern quality was achieved in all tests.

In order to better understand the possible self-synchronization phenomena, two tests were performed with selected conditions: integer and non-integer R -value, which are called here, synchronized and non-synchronized conditions. Rotational ratios (R) of 10:1 and 10.3:1 were used for the synchronized and non-synchronized conditions, respectively. This would allow an evaluation of the system synchronization

sensitivity. The phase angle between wheel and workpiece was obtained by using simple magnetic proximity sensor located on both part and wheel spindles. Figures 5 and 6 show the wheel phase angle and its variation in the start of every part rotation.

The results for the synchronized textured grinding tests show that the phase angle variation levels behave similarly to the grinding power. This means that each rotation of the grinding wheel starts a little earlier regarding the workpiece position. So, every part rotation the pattern is ground a little in advance. Therefore in this condition the system finds its stable position and no profile overlapping was observed, meaning that a self-synchronization is achieved. The self-synchronization condition was tested with the use of many other patterns and integer R values with success. Once the speed ratio is an integer and constant, the machine-wheel-workpiece system will find a synchronized condition to work. This conclusion is quite relevant since it allows the application of the proposed system in any machine with minor modification in the control system.

Figure 5. Phase angle and its variation for synchronized texturing grinding.

Figure 6. Phase and its variation angle for non-synchronized grinding.

Another interesting conclusion from the Figure 5 is that the changes in the phase angle are reduced when the grinding power is at lower levels. This happens in the beginning of the grinding cycle and during the spark-out phase. A long spark-out situation was also tested. In this case the power goes down to almost zero

and the phase angle gets constant, meaning that the system is self-synchronized where wheel and workpiece behave almost like two gears, but running at different surface speeds (that can be contrary). Increases in the phase angle variation happen only when the grinding power value increases.

In the non-synchronized condition shown in Figure 6 there is no relationship between power and phase angle variation confirming the hypothesis that the system only auto-synchronizes when R is an integer. Also, the change in the phase angle for every rotation is about 110 degrees, or a little less than one third of a rotation (since the R value was 10.3 and not 10.333). In these tests there was either no pattern generation or pattern overlapping on the workpiece surface. With these conclusions the concept of the system was finalized without the implementation of a synchronization control between wheel and workpiece.

3.2. Grinding of textured surfaces

The next phase of this research was for testing the system functionality for production of different textured surfaces. The results are briefly presented in Figures 7 and 8. Figure 7 shows the dressing acoustic maps for different grinding wheel textured surfaces. The ground parts are presented in the Figure 8 (diameter of 25 mm and grinding width of 50 mm). For better understanding of the results, both pictures also show one conventional surface without texturing as reference.

Figure 7. AE mapping from wheel dressing for texturing.

Figure 8. Conventional and textured workpiece surfaces.

The method made possible the successful transfer of the wheel patterns to the workpieces during a plunge grinding operation. These results successfully proved the functionality of the proposed grinding wheel-texturing method to produce engineered surfaces on workpieces. The system is capable of producing any pattern geometry with surface size larger than 2 mm x 0.5 mm and depth from 2 to 25 microns.

Therefore, new tests were carried out to demonstrate the practical application of patterned wheels for improving grinding performance.

3.3. Influence of wheel patterns in grinding performance

In this section the wheel textures were used to improve the grinding performance in a conventional application where no pattern is desired on the workpiece. For this it was necessary to ensure that the quality of the ground workpiece with textured wheels was equivalent to conventionally ground components. Different methods of grinding were tested in order to select the best to be used with textured wheels. Figure 9 presents the obtained roundness values for the tested strategies and AE mapping of the grinding process. The best method that ensures good quality to the part was found when grinding happened in two stages. Firstly the material was removed with a selected R during plunge. Then the spark-out stage was performed using a different R value, so any residual pattern would be destroyed.

Four tests were performed to evaluate the influence of the patterned wheel to the grinding process: conventional grinding with no texture (T1); Textured with a random pattern (by using white noise signal and lowpass filter of 50 Hz in the excitation system) (T2); textured grinding with triangular wave pattern (T3); textured grinding with linear pattern (T4); and textured grinding with cross linear pattern (T5). Figure 10 shows these patterns. The dia. 25 mm workpiece material was SAE4340 at 45 Rc. The wheel specification was 38A-80-KVHB. The infeed was 50 μ m for each cycle and 60 cycles for each pattern were performed to simulate a real production process. The feed rate in the plunge phase was of 0.5 mm/min. The grinding power was monitored in each cycle. In the end of each test, roundness and roughness were measured.

Figure 9. Roundness evaluation of ground workpiece.

The results presented in Figure 10 show that the textures applied to the grinding wheel can produce strong reductions in the specific power of the process and produce just a slight loss in the surface quality of the workpiece. The result suggests that the texturing can produce good impact in rough and semi-finishing grinding, strongly decreasing the spent energy or reducing the cycle time.

Figure 10. Roundness, roughness and specific grinding power.

The wheel life will depend on the product constraints, but it was found, for the tested case that similar life would be achieved with both textured and non textured tools. On the other hand, for applications where grinding burn is critical, the textured wheel should offer longer tool life, since the part was cooler for those processes. The wear mechanism of the grinding wheel was also evaluated by using AE mapping. The evaluation was performed by visualizing the AE intensity for consecutive dressing passes using $a_d = 2$ microns and looking at differences between the used and non-used region of the tool. By counting the number of dressing passes it is possible to know the

wheel wear. Figure 11 shows similar values for both patterned and conventional wheels.

4. Conclusions

The presented method is able to produce patterns on the wheel surface during the dressing operation. In addition, these patterns can be transferred to the workpiece surface during the grinding process.

Furthermore, it was also verified to use patterned wheels to optimize the grinding process. A significant reduction in the power was observed when using patterned wheels. The use of a specially designed cycle allowed acceptable quality workpiece surfaces. These results proved that with the same grinding wheel, it is possible to achieve different characteristics, increasing the flexibility in the application of grinding tools.

Figure 11. Grinding wheel AE dressing maps for wear analysis.

References

- [1] Matsui, S., Tamaki, J., 1986, Effect of Dresser Type on The Surface Topography of Grinding Wheel, Bull. Japan Soc. Of Prec. Eng, vol.20.
- [2] Verkerk, J., Pekelharing, A.J., 1979, The Influence of the Dressing Operation on Productivity in Precision Grinding, Annals of the CIRP, 28/2:487-495.
- [3] Koenig, W., Klocke, F., 1996, Fertigungverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Lappen, VDI – Verlag, GmbH, Dusseldorf.
- [4] Nakayama, K., Takaji, J. and Abe, T., 1977, Grinding Wheel with Helical Grooves - An Attempt to Improve the Grinding Performance, Annals of the CIRP, 25/1:133-138.
- [5] Kim, J.-D., Kang, Y.-H., Jin, D.-X., Lee, Y.-S., 1997, Development of Discontinuous Grinding Wheel With Multi-Porous Grooves, Int. J. Mach. Tools Manufact., 37/11:1611-1624.
- [6] Lee, K.W., Wong, P.K., Zhang, J.H., 2000, Study on the Grinding of Advanced Ceramics With Slotted Diamond Wheels, Journal of Materials Processing Technology, 10/230-235.
- [7] Denkena, B., Boehnke, D., Kästner, J., 2008, Microstructuring of Functional Surfaces by Means of Cutting Process, Prod. Eng. Res. Devel. 2:21-25.

- [8] Bruzzone, A.A.G., Costa, H.L., Lonardo, P.M., Lucca, D.A., 2008, Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance, *Annals of the CIRP*, 57/1:750-769.
- [9] Hashimoto, H., Ochiai, M., 2008, Optimization of Groove Geometry for Trust Air Bearing to Maximize Bearing Stiffness, *Journal of Tribology*, 30/031101-11.
- [10] Oliveira, J.F.G., Dornfeld, D.A., Winter, B., 1994, Dimensional Characterization of Grinding Wheel Through Acoustic Emission, *Annals of the CIRP*, 43/1:291–294.
- [11] Oliveira, J.F.G., Dornfeld, D.A., 2001, Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring, *Annals of the CIRP*, 50/1:217–220.

Contents lists available at [SciVerse ScienceDirect](http://SciVerse.ScienceDirect)

CIRP Annals Manufacturing Technology

Grinding process for profiled texturing

Eraldo Jannone da Silva^a, Alex Camilli Bottene^a, João Fernando Gomes de Oliveira (1)^{a,*}, Almir Atoatte^b, Alex de Souza Rodrigues^b

^a University of São Paulo – USP, School of Engineering – São Carlos – EESC, Department of Production Engineering, São Carlos, SP, Brazil

^b thyssenkrupp Metalúrgica Campo Limpo – Research & Development, Campo Limpo Paulista, SP, Brazil

Hydrodynamic textures require the production of cavities with a profile composed by two ramps with different angles. This demands the development of a grinding process able to firstly dress such patterns on the wheel surface and later copying them to the workpiece by grinding. Dressing patterns on wheels is a speed critical process, since very fast interpolations have to be performed. Grinding kinematics also influence the obtained geometry. This paper shows the development of a grinding process able to produce profiled workpiece patterns. Simulations and results show good process control and feasibility for industrial application.

Dressing, Grinding wheel, Part texturing

1. Introduction

Considering the great amount of energy losses due to friction of internal moving parts in combustion engines, product engineers currently demand alternatives in terms of redesign or downsizing (e.g. camless, three-cylinder engines), as well as wear resistant - low friction - coatings [1,2,3].

Since about 30% of the viscous losses in a combustion engine are related to the crankshaft, there is a great interest in its bearing optimization. Also, the start-stop technology requires special surface profile/texture able to retain oil in the bearings aiming wear reduction. The enhancement of crankshaft lubrication can be achieved by introducing textures on its bearings. Better pressure distribution, higher oil retention, higher lift forces and optimized oil film thickness are reached by adding micro tailored features at a particular arrangement to the main and pin external diameters [4]. Previous CIRP keynote paper on the manufacturing of freeform optics provides a comprehensive view on process configurations and innovative methods to synchronize tool and workpiece for the production of patterns using a piezo actuator [5]. This extensive work was adapted here for the application in a fast production grinding scheme.

The concept of producing textures by grinding using patterned wheels was first introduced in CIRP in 2010 [6]. In this development a dressing tool with one extra degree of freedom radial to the grinding wheel was used to produce patterns on the wheel surface. These

patterns were later copied to the workpiece by performing a synchronized grinding operation. Different types of features could be consistently applied as textures on ground parts.

The study of process feasibility and its application as a core technology for forged crankshafts of advanced engines has started in 2012, in a partnership with a major global crankshaft manufacturer for high performance engines. One of the first requirements was to control surface roughness inside and outside the texture cavities (or pockets) independently. This was accomplished by developing new grinding strategies and presented as a CIRP contribution in 2013 [7].

Among the surface finishing characteristics and shape (and distribution) of the texture cavities, it is now required that each texture has a specific profile in the circumferential direction. This paper is the third step in the development of a grinding process fully able to control the characteristics of textured surfaces including shape/distribution, roughness and now circumferential profile.

2. Grinding of profiled workpiece textures

Simulations and tests showed that the improvements in the operational parameters of the hydrodynamic radial bearings were extremely higher when featured with micro-ramp structures [4] of generic shape, as shown in Figure 1.

Figure 1. Generic micro-ramps profile for hydrodynamic radial bearings.

A desired circumferential pocket profile has to be precisely reproduced in the part during the texturing process by grinding. In particular, the transition between the bottom and the top of each feature in the circumferential direction, which is responsible for the increment in the localized lift force, should be composed by two ramps with different angles α_1 and α_2 .

Figure 2 shows the developed active dressing unit to apply similar pattern production strategy as presented in [6]. Here a diamond-dressing tool is attached to a linear bearing and, now, to a piezo-actuator. The unit is instrumented with a capacitive displacement transducer and an AE sensor connected to a fast RMS amplifier with time constant of about 10 microseconds. This design is quite rigid and provides a precise and fast dressing tool movement radial to the grinding wheel.

The dressing system control is performed using an open loop control in an external computer integrated to the machine CNC, where software runs the dressing program and the acoustic mapping monitoring [8]. The last is used for monitoring the correct pattern features distribution on the wheel surface.

Figure 2. Active piezo-dressing unit for the production of profiled patterns on the grinding wheel surface.

Considering that each pocket shape is firstly generated during the dressing process and later transferred to the part by a synchronized grinding operation, the obtained design details will depend on three main aspects:

- Response of the dressing unit: The interpolation movement between wheel rotation and diamond radial feed is quite fast. Thus, it is important to determine the

limits of interpolation speed that can be obtained by the dressing unit.

- Machine/wheel/dressing system response during dressing.
- Deformation in the profile caused by the intrinsic elements of the grinding contact geometry.

For a robust process design, it is important to model, test and simulate these three aspects, allowing the determination of feasible features for a given set of dressing and grinding conditions.

3. Modelling of the texturing process

3.1. Influence of the contact kinematics

Figure 3 brings a schematic grinding representation of a texture ramp in surface grinding, where a is the depth of cut and h_k is the depth of the texture (Equation 1). The wheel is considered as a milling cutter, as proposed by Malkin [9], with cutting points corresponding to the cutter teeth equally spaced at a distance L . Dressing produces the texture angle on the wheel with a linear reduction in its radius. This should result in an increase in the workpiece size of h_k along the segment AA'.

$$h_k = \frac{d_{s1} - d_{s2}}{2} \quad (1)$$

In up-grinding configuration, the last cutting point of the outermost diameter of the grinding wheel (d_{s1}) begins its contact with the workpiece at point A, following the blue curve path to point B, centred in O, with a depth of cut a . Displaced at distance O-O', the next cutting point represents the first of the innermost diameter of the grinding wheel ramp (d_{s2}). It describes the red curve path (A' to B'), but its depth of cut will be between zero and $a - h_k$. Therefore, in Figure 3, this grain will not touch the final surface of the workpiece and the desired ramp angle will not be produced. As a result, the cutting edges at the wheel ramp should not touch the workpiece.

Figure 3. Schematic representation of the cutting path for an idealized textured wheel.

The ramp angle α_{td} is a design parameter set in the dressing control software. The obtained ramp angle will be defined after the first grain in the innermost surface able to cut from the point A". The curve path A"-B" represents a consecutive cutting point of the innermost diameter, in which a depth of cut equal to $a-h_k$ is removed.

The length of the texture ramp (l_t) and the texture cavity step angle α_t are primary parameters for the cavity design. They are the geometrical constrains for a given wheel and workpiece sizes and kinematic configuration.

Considering the order of magnitude of the wheel diameter and texture depth, the curve path A-A" can be approximate as a straight line. Thus, the obtained cavity step angle for figure 3 is defined by:

$$\alpha_{tc} = \tan^{-1}\left(\frac{h_k}{l_t}\right) \quad (2)$$

Equation (3) presents the value of l_t similarly to the contact length expression [9]:

$$l_t = (h_k d_{s1})^{1/2} \quad (3)$$

By considering the equivalent diameter (d_e) instead of d_{s1} Equation (3) can be applied to cylindrical grinding configurations.

So, for design proposes, it will be impossible to produce ramps with ramp angle higher than the critical value α_{tc} . For α_{td} values lower than, or equal to α_{tc} , the resulting angle will be α_{td} .

3.2. System response constrains

The implementation of the texturing process starts with the wheel patterning during dressing. Fast penetration and/or retraction speeds are required. The free dynamic response of the developed active piezo-dressing unit is presented in Figure 4. The dressing was programmed for a sinusoidal movement of constant amplitude equal to 12 μm . The frequency was linearly varied from a minimum value corresponding to the wheel speed (21Hz) up to 56 times higher (1200 Hz). It can be seen that the resulting dressing tool displacement (measured with the displacement transducer described in Figure 2) was highly influenced by the excitation frequency, being nearly constant only for a short frequency interval (up to 107 Hz). The displacement value decreased and reached its minimum at 2.35 μm . System speed was calculated based on the acquired displacement values and a limit of 18.2 mm/s was detected. Thus, the speed response of the system, i.e. the ratio of the programmed and measured system speed, had decay for frequencies above 107 Hz.

Figure 4. Free dynamic response of the active piezo-dressing system

Once the system free dynamic response was determined, the effect of the dressing forces and machine dynamics into the system response should be verified. The forced dynamic response of the dressing unit was measured by dressing the wheel in a single dressing pass using the same tool penetration and frequency variation along the pass with the values described in the free dynamic response test. The acoustic emission wheel mapping was used as an evaluation tool to monitor the dressing tool displacement. This dressing pass was completed with a fixed dressing penetration (a_d) equal to 12 μm , plus a dynamic variation of $\pm 12 \mu\text{m}$. So dressing depth ranged from 0 to 24 μm . The grinding wheel and dressing tool specifications are the same described in section 4.

After finishing this particular dressing pass, consecutive static (no radial displacement) passes of $a_d = 1 \mu\text{m}$ (slicing strokes) were performed in order to measure the waves amplitude on the wheel surface. The measurements were made by using the acoustic mapping system presented in CIRP 2001 [8]. Here the AE RMS levels are plotted in levels of colours along each rotation of the grinding wheel. With this tool, it is possible to identify the presence of dynamic variations

in the dressing depth of cut caused by wheel form variations. The acoustic maps were collected for each $1\mu\text{m}$ dressing slice removed from the wheel surface. Once depth variations disappear in the acoustic map, it is possible to know the amplitude of the patterns by counting the number of dressing slices. Figure 5 shows the acoustic mapping of the wheel surface after 12 dressing passes slices. Each horizontal line represents the AE RMS level in one rotation of the grinding wheel. The vertical axis is the wheel width, along which the frequency of the excitation was changed.

The results of this evaluation showed a response similar to the figure 4, but with higher decay. In a specific test, the limit dressing speed for the full-engaged system was found to be of 5mm/s . This was the value considered for simulation proposes.

4. Simulation and experimental analysis

A process simulation tool was implemented using Labview software. It considers all the aspects explained in section 3, i.e., machine-tool-piezo-dressing unit response and contact geometry influence. Experimental grinding of patterned workpieces was also performed. This section shows the comparison of experimental measurements and simulation results.

Parts were ground using a 55A46.1K8VC1 aluminium oxide wheel, cutting conditions were: $v_s = 30\text{m/s}$; $v_f = 0.180\text{mm/min}$; spart-out = 4 part turns. The dressing conditions applied for the production of the patterned wheel were: dressing overlapping $U_d = 6$; dressing depth of cut $a_d = 12$ to $24\mu\text{m}$. The diamond dressing tool was a single tip square shape, width $b_d = 0.6\text{mm}$. The dressing tool was a square shape single point diamond, section $0.6 \times 0.6\text{ mm}$. The workpieces were produced with hardened ANSI 4340 steel. This material is generally applied on bearings for hydrodynamic tests. For each test, the profile and the speed ratio between wheel and workpiece were selected to achieve the desired number of patterns, design shape and final depth.

Figure 5. Acoustic mapping of the grinding wheel during the 12th static dressing of $a_d = 1\mu\text{m}$ pass after the dynamic dressing.

Figure 6 shows three consecutive circumferential profile plots of a textured workpiece. The four graphs represent respectively the measured ground profile (blue continuous line), programed raw profile (orange dotted line), simulated profile considering the limited piezo-dressing unit response (green dotted line) and the simulated profile considering the piezo-dressing unit response and the contact geometry influence (red line).

Figure 6. Input, simulated and experimental measurement of three consecutive pocket circumferential profiles.

The influence of the two main processes constrains can be summarized as: the limited speed response of the piezo-dressing unit reduces the diamond total infeed during dressing, leading to a lower ramp angle and a shallower profile; and the wheel contact kinematics will produce a rounder ramp with a lower angle and increased pocket width. In this case, for a desired pocket depth of $12\mu\text{m}$, it was necessary to program a double value of $24\mu\text{m}$. The maximum obtainable ramp angle was of about 1.2° . Figure 7 shows four cases of measured and simulated roundness profiles where different ramp shapes were ground. A reasonable matching between simulation and measured on shape and amplitude was obtained for all tested conditions. The synchronization was driven only by the grinding forces.

Figure 7. Experimental (a, c, e and g) and simulated (b, d, f and h) roundness profiles for textured workpieces.

There are many possible conditions to produce textures on a workpiece. It is possible to produce more patterns per rotation on the wheel surface and grind the part with a lower RPM ratio (wheel RPM/part RPM) in the synchronized process. The inverse can also

be done, i.e., lower number of patterns per rotation of the wheel and higher speed ratio.

In figure 7 a) and b), two patterns per wheel rotation and angular speed ratio of 20 was used. The obtained pocket depth was much lower than the programed value (dotted black line). This happened mainly due to limited speed response of the dressing system. In this case, the need for infeed speed was higher than the system could respond. Figure 7 c) and d) show the same effect, now increased due to the even higher number of patterns per wheel rotation, in this case equal to 4. The profile rounding process produced by the wheel/part engagement is also present on both cases. For each wheel design and system response there will be a best set of parameters that can be found by simulation and experimentally confirmed.

Figure 7 e), f), g) and h), show other roundness plots of textures produced by dressing the wheel with just one pattern per rotation. In this case, the available dressing system response was enough to keep the angles and, consequently, the depth. Due to a lower part RPMs required for grinding in these conditions, it was also possible to reduce the rounding effect caused by the wheel/workpiece engagement, leading to profiles quite close to the programed data. In these last two cases, the chosen patterns had no flats on the top, in order to finish the outer surface in a polishing or fine grinding operation, such as proposed in [7].

5. Conclusions

The main conclusions of this research are:

- The simulated process showed similar results when compared with the roundness measurements on the ground workpiece.
- The response speed of the piezo-dressing unit limits the maximum displacement of the dressing tool. Lower frequency dressing is the best option to reduce this effect.
- Wheel-part contact geometry can also limit the achievement of the desired pattern profiles. High equivalent wheel diameter limits maximum angles. Best results are achieved using higher speed ratios or lower equivalent diameters.
- The system was able to produce a wide range of patterns; however, the achievable angle/depth will be limited. The purposed simulation system is a powerful tool for evaluating the input parameter to get the desired profile.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge CNPq and thyssenkrupp R&D for sponsoring this research.

References

- [1] Ashhab, M.S.S., 2008, Fuel Economy and Torque Tracking in Camless Engines through Optimization of Neural Networks, *Energy Conversion and Management*, 49:365-372.
- [2] Frederic, A., Picron, V., Hobraiche, J., Gelez, N., Gouiran, S., 2010, ElectroMagnetic Valve Actuation System e-Valve: Convergence Point between Requirements of Fuel Economy and Cost Reduction, *SAE Technical Paper 2010-01-1197*:1-15

- [3] Xu, J., Chang, S., Fan, X., Fan, A., 2015, Effects of Electromagnetic Intake Valve Train on Gasoline Engine Intake, *Applied Thermal Engineering*: 1-8
- [4] Salles, B.B., Cardoso, R.S., Duarte, D., 2014, Crank-drive with Bearings having Micro-ramp Structures of Asymmetric Form, WIPO - World Intellectual Property Organization, WO 2014/006481 A1:1-23
- [5] Fung, F. Z., Zhang, X.D, Weckenmann A., Zhang, G.X., Evans C., 2013 Manufacturing and measurement of freeform optics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(2): 823-846
- [6] Oliveira, J.F.G., Bottene, A.C., Franca, T.V., 2010, A Novel Dressing Technique for Texturing of Ground Surfaces, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59/1:361-364
- [7] Silva, E.J., Oliveira, J.F.G., Salles, B.B., Cardoso, R.S., Reis, V.R.A., 2013, Strategies for Production of Parts Textured by Grinding using Patterned Wheels, *Annals of the CIRP*, 62/1:355-358
- [8] Oliveira JFG, Dornfeld DA (2001) Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50(1):217-220.
- [9] Malkin, S., Guo, C., 2008, Chapter 3.3 Cutting Path, in: *Grinding Geometry and Kinematics*, In: *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*, Industrial Press Inc.: 47-53.