

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Celso Vander Viana

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS LASER NA
TEXTURIZAÇÃO DE ANÉIS DE PISTÃO COM
COBERTURA EM PVD ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DO DOE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Orientador: Prof. Sebastião Carlos da Costa, Dr.

Co-orientador: Prof. João Roberto Ferreira, Dr.

Itajubá

2014

VIANA, Celso Vander
Otimização dos parâmetros laser na texturização de anéis de pistão
com cobertura em PVD através da utilização do DOE / Celso Vander
Viana – Itajubá: UNIFEI, 2014.

98p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá,
2014.

Orientador: Sebastião Carlos da Costa

1. Otimização – Parâmetros Laser – Projeto e Análise de
Experimentos – RSM

I. Costa, Sebastião Carlos. II. Universidade Federal de Itajubá III.
Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Celso Vander Viana

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS LASER NA
TEXTURIZAÇÃO DE ANÉIS DE PISTÃO COM
COBERTURA EM PVD ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DO DOE**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson Caoru Kitani (USP)

Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes (UNIFEI)

Prof. Dr. João Roberto Ferreira (Co-orientador)

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (Orientador)

Itajubá

2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, abençoando cada momento em minha vida me dando força, sabedoria e persistência para o alcance dos meus objetivos.

À minha família, pelo exemplo de vida e humildade.

Aos professores e amigos Sebastião Carlos da Costa e João Roberto Ferreira, pela paciência e orientação que muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa Luciana Pires e meus filhos Lucas, Mariana e João Manuel, pelo apoio, carinho, tolerância e compreensão nos momentos difíceis.

Aos funcionários da empresa Mahle Metal Leve, pela ajuda nas atividades experimentais e de laboratório.

Aos colegas de pós-graduação, em especial Rafael Miranda e José Henrique, pela convivência, amizade e apoio.

A todos os professores do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

A todos os meus amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização do laser na texturização de superfícies tem ganhado destaque nos últimos anos devido às exigências cada vez maiores por aplicações para redução de desgaste e lubrificação em componentes mecânicos. A utilização do laser tem emergido como uma opção tecnológica devido à facilidade e interação nos mais diversos tipos de materiais, onde a exigência por geometrias e formas diferenciadas podem fazer diferença e influenciar diretamente na qualidade da aplicação para se atingir efeitos da gravação em superfícies diversas. No entanto, visando garantir a qualidade final da aplicação, é importante que o procedimento de gravação empregado seja bem ajustado, para que as texturas sejam realizadas com a geometria desejada, apresentando ao mesmo tempo bons índices de produtividade. Nesse contexto, os estudos referentes à otimização dos parâmetros laser em anéis de aço inox com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN), (tecnologia utilizada para deposição de material cerâmico sobre uma superfície metálica), tem como finalidade alterar as propriedades mecânicas do material de modo a obter maior resistência ao desgaste. Buscou-se identificar a combinação ótima dos parâmetros que oferecessem os melhores resultados quanto à geometria da textura, garantindo ao mesmo tempo bons níveis de qualidade. As respostas analisadas incluíram a largura, comprimento e profundidade das ranhuras, e a combinação destas três respostas, representam as características geométricas das ranhuras. Os parâmetros utilizados para a otimização foram: Desfocagem em relação à peça, o percentual de potência do laser fixado em 100%, a velocidade de aplicação e a frequência de sobreposição dos pulsos. Para a obtenção dos resultados ótimos, utilizou-se um método experimental em duas fases. Inicialmente, empregou-se a Metodologia de Superfície de Resposta para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados e análise dos efeitos dos parâmetros. A otimização do processo foi realizada e os resultados mostram que todos os parâmetros analisados foram considerados significativos, sendo que o grau de importância entre eles varia de acordo com as respostas de interesse permitindo assim que os resultados fossem alcançados.

Palavras-chave: Texturização a laser de superfícies, Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfície de Resposta. Otimização multi-objetivo.

ABSTRACT

The use of the laser for surface texturing has gained prominence in recent years due to increasing requirements on applications for reduction of wear and lubrication for mechanical components. Laser technology has emerged as an technical option due to the ease and interaction in a wide variety of materials, where the demand for different geometries and shapes can make a difference and directly influence the quality of the application to achieve effects of engraving various surfaces. However, in order to guarantee the final quality of the application, it is important that the employee recording procedures well adjusted, so that the textures are carried out with the desired geometry, showing at the same time good productivity indices. In this context, the studies on the optimization of laser parameters on stainless steel rings coated by PVD - Chrome Nitrate (CrN) with covering in PVD (technology used for the deposition of ceramic material on a metal surface), has the purpose of changing the mechanical properties of the material so as to obtain higher wear resistance. The research has the aim to identify the optimal combination of parameters that would provide the best results regarding the geometry of the texture, while ensuring high levels of quality. The responses analyzed included the width, length and depth of the grooves, and the combination of these three responses, representing the geometric characteristics of the grooves. The parameters used for optimization were the defocusing in relation to the work-piece, the percentage of laser power, laser speed and the frequency of the pulses overlap. In order to obtain the optimum results, it was used an experimental method divided in two phases. Initially, it was used the Response Surface Methodology (RSM) for the planning of the experiments, data collection and analyze of the effects of parameters. The optimization of the process was carried out and the results show that all parameters analyzed were considered significant and the degree of importance among them varies according to the responses of interest thus allowing that the results would be achieved.

Keywords: Laser Surface Texturing, Design of Experiments, Response Surface Methodology, Multi-objective Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Princípio de funcionamento.....	8
Figura 2.2 – Estrutura de um sistema laser.....	9
Figura 2.3 – Princípio de operação do laser.....	10
Figura 2.4 – Estrutura de um laser gasoso.....	10
Figura 2.5 – Estrutura do sistema de marcação a laser.....	11
Figura 2.6 – Estrutura de um laser semiconductor.....	11
Figura 2.7 – Fonte do laser com Q-Switch.....	12
Figura 2.8 – Estrutura do sistema de marcação a laser.....	13
Figura 2.9 – Relação entre os tipos de laser e comprimento de ondas.....	14
Figura 2.10 – Princípio de operação do laser para texturização.....	15
Figura 2.11 – Parâmetros utilizados de acordo com pesquisas relacionadas à texturização de superfícies.....	17
Figura 2.12 Sobreposição dos impulsos, frequência da cadência dos impulsos, diâmetro do raio e velocidade de avanço.....	18
Figura 2.13 – Ajuste do ponto focal.....	19
Figura 2.14 – Mecanismo de ajuste de ponto de foco interno.....	19
Figura 2.15 – Distância de trabalho e deslocamento da desfocagem.....	20
Figura 2.16 – Representação do anel de pistão.....	22
Figura 2.17 – Diferentes coberturas e tratamentos superficiais na face de contato do anel.....	23
Figura 2.18 – Desgaste relativo por coberturas.....	24
Figura 2.19 – Estimativa de desgaste para anéis de compressão em motores a diesel - Camada PVD vs. cromo cerâmico.....	24
Figura 2.20 – Estimativa de desgaste para anéis de compressão aplicação diesel – Desgaste na região das pontas do anel “Tip wear”.....	25
Figura 2.21 – Distribuição energética nos motores de combustão interna.....	25
Figura 2.22 – Desgaste abrasivo e por corrosão nas superfícies dos anéis de compressão.....	26
Figura 2.23 – Desgaste adesivo e por fadiga nas superfícies dos anéis de compressão aplicação.....	26
Figura 2.24 – Camada superficial de nitreto de cromo aplicado em aço inox.....	27
Figura 2.25 – Formas típicas de texturização: (a) circular, (b) elíptica, (c) triangular.....	29

Figura 2.26 – Mudança de pressão ao longo da cavidade e influência da profundidade de cavidade no campo de fluxo.....	30
Figura 2.27 – Distribuição de pressão de diferentes formas de texturas e orientações (a) Círculo, (b) Triângulo, (d) Elipse, (e) Elipse.....	30
Figura 2.28 – Perfil geométrico de aplicação por laser: a) 1mm b) 3mm.....	31
Figura 2.29 – Ilustração de duas configurações da região de texturização da face da ponta do anel. (a) Texturização Total e (b) Texturização Parcial.....	33
Figura 2.30 – Quantidade de publicações desde 2009.....	34
Figura 2.31 – Campo de áreas de pesquisa relacionadas à texturização de superfícies.....	34
Figura 2.32 – Classificação da pesquisa científica.....	35
Figura 2.33 – Arranjo composto central para três fatores.....	40
Figura 2.34 – Fronteira de pareto para um problema biobjetivo.....	42
Figura 3.1 – Texturização a laser: (a) Canais (b) Reservatórios (c) ranhuras.....	45
Figura 3.2 – Característica do objeto de estudo associado ao processo de texturização a laser.....	46
Figura 3.3 – Método experimental – Fase 1: Metodologia de Superfície de Resposta.....	50
Figura 3.4 – Método experimental – Fase 2: Otimização pelo E-Méthod.....	51
Figura 3.5 – Equipamentos utilizados.....	53
Figura 3.6 – Microscópio óptico tridimensional para medição da posição com ampliação de 50X.....	54
Figura 3.7 – Perfilômetro MarSurf XC 20 para medição da profundidade.....	54
Figura 4.1 – Escopo do trabalho de pesquisa.....	55
Figura 4.2 – Rugosidades geradas pelo laser na superfície de contato dos anéis.....	58
Figura 4.3 – Superacabamento da face de contato dos anéis para eliminar rebarbas.....	59
Figura 4.4 – Tempo de ciclo gerado na tela do software trumark para gravação de duas ranhuras.....	59
Figura 4.5 – Procedimento para medição da geometria da ranhura.....	60
Figura 4.6 – Região do anel onde foram aplicadas as ranhuras.....	60
Figura 4.7– Coeficientes de Anderson-Darling (AD) menores que um e p-values maiores que 5% de significância.....	66
Figura 4.8 – Efeitos principais sobre a profundidade da ranhura.....	68
Figura 4.9 – Efeitos principais sobre o tempo de aplicação do laser sobre a ranhura.....	68
Figura 4.10 – Efeitos principais do levantamento de rebarbas na superfície de contato dos anéis.....	69

Figura 4.11 – Efeito da interação entre a desfocagem e velocidade de aplicação do laser sobre a profundidade da ranhura ($F_e = 72500$ Hz; $A = 1,5^\circ$).....	70
Figura 4.12 – Efeito da interação entre a desfocagem e ângulo sobre a profundidade da ranhura ($F_e = 72500$ Hz; $V_L = 475$ m/min).....	70
Figura 4.13 – Efeito da interação entre a velocidade e a desfocagem sobre o tempo de exposição do laser na peça ($D = 2$ mm; $A = 1,5^\circ$).....	71
Figura 4.14 – Efeito da interação entre a velocidade e a frequência sobre a rebarba ($D = 2$ mm $A = 1,5^\circ$).....	72
Figura 4.15 – Efeito da interação entre a velocidade e a desfocagem sobre o tempo de exposição do laser na peça ($F_e = 72500$ Hz $A = 1,5^\circ$).....	72
Figura 4.16 – Planilha desenvolvida para a otimização da texturização em anéis inoxidável com cobertura em PVD.....	74
Figura 4.17 – Geometria otimizada para uma profundidade de 0,010 mm.....	75
Figura 4.18 – Geometria otimizada.....	76
Figura 4.19 – Geometria otimizada (a).....	77
Figura 4.20 – Geometria otimizada (b).....	77
Figura 4.21 – Geometria otimizada (c).....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Características do processo de gravação.....	15
Quadro 2.2 – Tipos de desgastes para anéis de pistão.....	23
Quadro 2.3 – Benefícios com o emprego do DOE para o Projeto de Análise de Experimentos	37
Quadro 2.4 – Características as principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos	38
Quadro 3.1 – Níveis de fixação dos parâmetros utilizados na caracterização da geometria das texturas.....	47
Quadro 3.2 – As especificações para o sistema do laser utilizado.....	52
Quadro 4.1 – Variáveis de respostas para os experimentos.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros do laser estudados nas pesquisas anteriores.....	16
Tabela 4.1 – Parâmetros e níveis de trabalho	56
Tabela 4.2 – Parâmetros fixos, tipos e níveis de trabalho.....	56
Tabela 4.3 – Composição química do metal base e metal de adição	56
Tabela 4.4 – Matriz experimental.....	61
Tabela 4.5 – Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos.....	63
Tabela 4.6 – Análise de Variância, Ajuste e adequação dos modelos	64
Tabela 4.7 – Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos finais.....	65
Tabela 4.8 – Análise dos resíduos.....	65
Tabela 4.11 – Resultados dos experimentos de confirmação.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
CW	<i>continuous wave</i>
CWM	<i>continuous wave modulated</i>
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central ou <i>Central Composite Design</i>
CCF	Arranjo Composto de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i> ou Projeto e Análise de Experimentos
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
EQMM	Erro Quadrático Médio Multivariado
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
HDD	<i>Heavy Duty Diesel</i>
HSD	<i>Heavy Speed Diesel</i>
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LST	<i>Laser Surface Texturing</i>
MarSurf.	<i>PC-based Stationary Contour Measuring Stations</i>
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
Nd:YAG	<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet</i>
OGP	<i>Optical Gaging Production</i>
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> ou Mínimos Quadrados Ordinários
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
PC	<i>Principal Component</i> ou Componente Principal

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Rendimento do processo
ρ	Porcentagem de explicação do componente principal
Π	Produtório
Σ	Somatório
ζ_y	Alvo definido para a resposta
σ_y	Desvio-padrão experimental da resposta
μ_y	Média experimental da resposta
A°	Ângulo da peça
AD	Coefficiente de Anderson-Darling
C	Resistência à corrosão
D	Desfocagem
Dp	Desfocagem da peça
F	Frequência
F_e	Frequência do laser
H	Dureza
L	Comprimento
M	Microestrutura
P	Profundidade
R	Rebarba
R^2	Coefficiente de determinação
S	Aspecto superficial
V	Velocidade
V_L	Velocidade do laser
W	Largura da ranhura
x	Variáveis independentes
X^T	Vetor transposto das variáveis de controle
y	Resposta de interesse
$Z(y \zeta_y)$	Valor padronizado da resposta em relação ao alvo
$Z(y)$	Valor padronizado da resposta
Σ	Somatório
α	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
β	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
ε	Erro experimental

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Importância do tema	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodologia de pesquisa	5
1.4. Limitações.....	5
1.5. Estrutura do trabalho.....	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. Considerações iniciais	7
2.2. Fundamentos do raio laser	8
2.2.1. Princípios de operação	9
2.2.2. Laser para texturização de superfícies	14
2.2.3. Influência dos parâmetros laser aplicado em texturização.....	16
2.3. Revestimentos de superfícies em anéis e seus impactos.....	20
2.3.1. Texturização de superfícies e seus efeitos tribológicos	28
2.3.2. Texturização em anéis com cobertura de PVD	31
2.4. Pesquisas anteriores relacionadas à texturização de superfície	33
2.4.1. Objetivos e critérios de busca.....	33
2.4.2. Classificação dos trabalhos quanto à data de publicação.....	33
2.4.3. Classificação da pesquisa dentro do universo científico.....	34
2.5. Projeto e Análise de Experimentos.....	36
2.6. Metodologia de Superfície de Resposta	38
2.7. Otimização multi-objetivo	41
3. MÉTODO EXPERIMENTAL.....	45
3.1. Considerações iniciais	45
3.2. Problema de pesquisa	45
3.3. Metodologia de pesquisa	49
3.4. Procedimento experimental	52
3.5. Considerações finais	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1. Considerações iniciais	55
4.2. Análise Fatorial.....	55
4.3. 1ª Fase: Metodologia de Superfície de Resposta.....	57
4.3.1. Definição da matriz experimental	57
4.3.2. Execução dos experimentos e registro das respostas	58

4.3.3. Modelagem matemática das respostas	62
4.3.4. Adequação e ajuste dos modelos.....	63
4.3.5. Análise dos resíduos.....	65
4.3.6. Obtenção das superfícies de resposta	66
4.3.7. Análise dos efeitos principais dos parâmetros	67
4.3.8. Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros.....	69
4.3.9. Otimização	73
4.3.10. Validação dos resultados	75
5. CONCLUSÕES.....	78
5.1. Contribuições do trabalho	79
5.2. Sugestões para estudos futuros.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância do tema

A engenharia da manufatura normalmente está associada as exigências de transformação e agregação de valor aos bens produzidos através da aplicação de um tipo de tecnologia que reflete, em uma escala superior, o desempenho e a qualidade final destes bens. A texturização de superfícies, com objetivos específicos, se encaixa dentro deste patamar de exigências. A texturização de superfícies com objetivos tribológicos é uma tecnologia produtiva que tem se destacado como um elemento importante na redução de atrito em superfícies para melhorar o desempenho de peças mecânicas sujeitas a intensas solicitações. Várias técnicas de texturização tem sido empregadas para preparar as características geométricas, normalmente de dimensões micrométricas, em superfícies texturizadas, entre as quais se destacam os ataques químicos, usinagem eletroquímica, texturização a laser, entre outros.

A texturização a laser de superfícies (do inglês LST - Laser Surface Texturing) parece ser o mais avançado de todos os métodos conhecidos para aplicações tribológicas. Isto se deve principalmente pelo aumento das exigências relacionadas ao melhor desempenho e confiabilidade de sistemas mecânicos nos diversos ambientes industriais. Ao mesmo tempo, o processo se adequa bem quando da utilização de novos materiais que permitem ganhos de eficiência e redução de perdas de energia através da redução de atrito em componentes mecânicos. Grande parte desta eficiência advém do fato de que as micro-ondulações das superfícies texturizadas tem o potencial para atuar como um rolamento hidro-dinâmico contribuindo para uma lubrificação completa ou mista entre os seus componentes. Em função de sua importância e eficiência conjuntamente com a potencialidade de trabalhar geometrias com perfis complexos sobre materiais com dureza elevada para a criação de superfícies com características especiais, tem feito da texturização a laser uma aplicação crescente em vários segmentos industriais. Este interesse é justificado pelo fato de que texturas com propriedades e dimensões desejadas podem ser produzidas de forma rápida, econômica e sem contato direto com a peça através da utilização da tecnologia LST. Este é o caso, por exemplo, dos segmentos industriais relacionados aos selos mecânicos, anéis de pistão, rolamentos axiais, superfícies lubrificadas por água, entre outras. No que tange a aplicações em anéis de pistão, Etsion e Sher (2009) afirmam que a texturização a laser permite uma redução de atrito que pode resultar em uma economia de 4% no consumo de combustível em caminhões, porém

este desempenho é altamente dependente do perfil topográfico (geometria) e acabamento da texturização. Este fato mostra a importância do aperfeiçoamento na obtenção de geometrias adequadas como forma de melhoria da eficiência neste setor.

A tecnologia LST baseia-se em um feixe de laser pulsante que, por um processo de ablação do material, gera milhares de micro poros ou ondulações nas superfícies trabalhadas. Entretanto este perfil geométrico deve ser rigorosamente controlado no sentido de se conseguir o máximo de eficiência em aplicações tribológicas. Para atingir tais objetivos, os parâmetros do processo de texturização necessitam de um controle muito preciso de tal forma a determinar suas influências individuais ou de interação para que, posteriormente, possam ser otimizados para aplicações relacionados aos diversos materiais empregados. O tipo de laser, os seus respectivos parâmetros e ajustes são os principais responsáveis para se atingir as diversas geometrias propostas. Entretanto tais ajustes que permitam uma aplicação confiável e segura para os diversos tipos de materiais, com ou sem coberturas específicas como no caso de anéis de pistão, não é tarefa das mais fáceis, exigindo por parte dos profissionais envolvidos, conhecimentos técnicos específicos associados a muitos testes práticos.

Considerando os vários tipos de materiais, os anéis de aço inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) se mostram como uma das aplicações mais frequentes em motores de combustão interna, em especial motores a diesel, onde as elevadas temperaturas de combustão exigem utilização de materiais com elevada dureza. Estes são utilizados por possuir uma camada com propriedades anticorrosivas conjugado com uma resistência adequada para suportar ambientes sujeitos ao alto desgaste por corrosão. Em motores a diesel esta exigência é ainda maior devido ao desgaste na medida em que superfícies atritadas podem provocar desgastes por abrasão e corrosão. Logicamente que isto surge em função de que duas superfícies ao se movimentarem, uma em relação à outra, ocorrerá o desgaste, sendo que este pode ser definido como um prejuízo mecânico a uma ou as duas superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Em muitos casos, este desgaste leva a um aumento contínuo da folga entre as partes que se movimentam ou a uma indesejável liberdade de movimento e perda de precisão. A perda por desgaste de pequenas quantidades relativas de material pode ser suficiente para causar a completa falha dos componentes mecânicos envolvidos, sendo a lubrificação das superfícies a forma mais efetiva de reduzir a fricção e, conseqüentemente, o desgaste superficial. Nesta área de aplicação específica (foco principal deste trabalho), Etsion e Sher (2009) avaliaram o efeito da texturização a laser de superfícies em anéis de motores a diesel sobre o consumo de combustível e a composição do gás de escape, comprovando as vantagens de sua utilização.

Por outro lado, Yu, Wang, e Zhou (2010) verificaram que o formato das texturas e sua orientação tem influências significativas sobre o desempenho tribológico de superfícies texturizadas. Como resultado, a topografia tridimensional gravado de microtexturas de diferentes formas devem ser controladas de forma precisa e descritas quantitativamente. No entanto, informações relativas a avaliação quantitativa da geometria texturizada em diferentes metais ainda são escassas na literatura.

A texturização de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) se caracteriza como uma atividade de elevada complexidade devido ao fato de que elevados níveis de temperatura e deposição de energia, necessários para provocar a fusão, são alcançados em curto espaço de tempo, podendo tornar o processo instável e dependente de alguns cuidados. Por sua vez, a geometria texturizada bem como o seu perfil topográfico adequado são fundamentais para o armazenamento de uma quantidade adequada de óleo lubrificante que conduza ao mesmo tempo a bons índices de redução de desgaste e atrito. Porém, o processo de texturização a laser é um processo que apresenta vários parâmetros de entrada e múltiplas variáveis de resposta, o que faz com que o adequado controle do processo seja fundamental no sentido de se obter as superfícies consideradas otimizadas.

Porém, para auxiliar nestes desafios, técnicas experimentais podem ser utilizadas com o intuito de tornar tais tarefas mais rápidas e menos empíricas, permitindo entre outras vantagens, maior agilidade e aplicabilidade nos meios industriais, através do conhecimento da influência das variáveis e otimização em relação ao que se pretende atingir. Muitas destas técnicas se baseiam em métodos estatísticos representados pelo projeto e análise de experimentos (DOE do inglês *Design of Experiments*). Dentro da engenharia de manufatura, diferentes métodos de otimização de processos tem sido utilizados de forma cada vez mais eficiente e econômica. Assim, métodos como a Metodologia de Superfície de Respostas (MSR) e o seu índice de otimização descrito como Função *Desirability*, o método Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) combinando as técnicas da Metodologia de Superfície de Resposta e da Análise de Componentes Principais para a otimização simultânea de múltiplas respostas correlacionadas, os algoritmos de busca como o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o Algoritmo Genético (AG) vêm sendo constantemente empregados (PAIVA, 2008). As utilizações destes métodos normalmente estão associadas a técnicas e estatísticas sofisticadas como o Projeto e Análise de Experimentos, o qual permite uma compreensão ampla a respeito de um fenômeno, contribuindo para a melhoria de eficiência dos processos e níveis de qualidade dos produtos.

1.2. Objetivos

Considerando a importância da geometria de texturização de anéis de pistão em aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) para aplicações automotivas, bem como as dificuldades de sua obtenção através do ajuste dos parâmetros do laser no processo de texturização, o desenvolvimento deste trabalho se propõe a atingir o seguinte objetivo: Otimização dos parâmetros do laser no processo de texturização, visando o desenvolvimento de modelos matemáticos e avaliação das influências das principais variáveis do processo a laser sobre a geometria de ranhuras, qualidade e produtividade do processo de obtenção aplicado em anéis para o setor automotivo.

A condução da pesquisa foi realizada através da texturização a laser em anéis de aços inoxidáveis com cobertura de PVD procurando atingir uma geometria específica pré-determinada. O processo de texturização a laser possui uma série de variáveis de entrada a serem reguladas, cuja relação de importância não é conhecida. Em função de escassas informações na literatura a respeito da influência destas variáveis, algumas etapas se tornaram necessárias para que o objetivo principal fosse atingido, consistindo estas etapas em objetivos secundários, os quais são descritos a seguir:

- a. Ampliar o conhecimento sobre o processo e sua aplicabilidade sobre a obtenção e influência da geometria em anéis de pistão;
- b. Identificar através da realização de testes preliminares, o grau de importância das variáveis do processo, selecionando entre elas, as principais variáveis influentes;
- c. Avaliar a aplicabilidade das técnicas de projeto e análise de experimentos como ferramenta auxiliar para determinação da influência das variáveis na obtenção de uma geometria previamente definida;
- d. Aplicar a MSR na otimização da geometria e perfil topográfico do processo em anéis para o setor automotivo.

1.3. Metodologia de pesquisa

O método de pesquisa utilizado foi baseado nas técnicas do Projeto e Análise de Experimentos, sendo dividido em duas fases:

1ª) Metodologia de Superfície de Resposta, para desenvolvimento de modelos matemáticos e análise da influência dos parâmetros;

2ª) Otimização pelo método E-Method para determinação dos parâmetros ideais para as respostas.

1.4. Limitações

Este trabalho encontra-se limitado pelas seguintes condições:

- O processo de texturização estudado foi sobre a aplicação do laser em anéis de aço inoxidável com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN), portanto os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros materiais e processos;
- Refere-se aos parâmetros de processos analisados neste trabalho foram: A velocidade de aplicação do laser, frequência de pulso e distância de aplicação do laser-peça (Desfocagem). Outra variável como potência foi considerada como parâmetro fixo. Outros parâmetros como o ângulo de inclinação da peça e o tipo de laser utilizado, também foram considerados;
- Para as respostas do processo este trabalho propõem a otimização da geometria, (largura, comprimento e profundidade das ranhuras), sendo considerada também a qualidade superficial das micro ranhuras e o tempo de aplicação do laser.
- Entre as repostas do processo este trabalho se propôs à otimização apenas da geometria, da produtividade e da qualidade superficial dos revestimentos. Sendo assim, propriedades como a dureza, microestrutura e zona termicamente afetadas (ZTA) não foram analisadas;
- Entre as técnicas do Projeto e Análise de Experimento, foi utilizado a Metodologia de Superfície de Resposta;
- Como método de otimização, foi empregado o E-Method para os alvos e respostas.

1.5. Estrutura do trabalho

Dentro da proposta apresentada, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

No **Capítulo 1** é realizado uma introdução sobre o tema pesquisado, abordando a importância da texturização frente a processos alternativos de modo a ressaltar a importância da obtenção de uma geometria adequada e a possível utilização de métodos estatísticos na adequação deste processo frente a aplicações em texturização de anéis de pistão. Neste sentido, os objetivos, limitações e contribuições esperadas nesta pesquisa são apresentados neste capítulo.

No **Capítulo 2** tem-se a fundamentação teórica dos principais conceitos relacionados ao processo de texturização a laser, bem como a aplicação da texturização em anéis de motores a combustão interna aplicada a motores diesel em os anéis de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) são descritos frente as principais contribuições científicas extraídas da literatura. Discute-se ainda as técnicas de experimentação e otimização baseadas no Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfícies de Resposta e Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), que constituirão a base dos métodos de análises utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

No **Capítulo 3** há a descrição do método experimental utilizado, detalhando os equipamentos empregados e as etapas seguidas em cada fase do estudo.

No **Capítulo 4** é descrito e discutido a aplicação do método experimental, os resultados obtidos e a otimização dos parâmetros do processo de texturização a laser na obtenção de geometrias previamente definidas em aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN).

No **Capítulo 5** são apresentadas as conclusões, contribuições e sugestões para estudos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Considerações iniciais

Conforme mencionado no final do capítulo anterior, o objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos que compõem o suporte teórico deste trabalho. Em relação à texturização aplicado anéis de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) a discussão das ideias é de grande importância para que as características desse processo sejam bem conhecidas, incluindo as suas vantagens, desafios na sua aplicabilidade, bem como suas aplicações em setores diversos. Assim, são apresentados os principais conceitos e definições sobre a técnica laser e, mais especificamente, a sua utilização na texturização de superfícies com a finalidade de melhorar o desempenho tribológico em aplicações em anéis para o setor automotivo.

Cada vez mais o uso do laser se populariza na manufatura, seja no corte de materiais, soldagem, gravação, medição, etc. A redução do custo da tecnologia contribuiu para a conquista de maior espaço, mas o desenvolvimento de novas aplicações também tem sido fundamental, como é o caso da manufatura aditiva de metais por sinterização a laser. Percebe-se que esta tecnologia tem avançado e conquistado espaço crescente em vários segmentos, particularmente na furação de materiais, na produção de micropeças, na micro usinagem de precisão, gravação de peças, bem como na produção de micro canais e ranhuras em peças, denominado de texturização.

A texturização de superfícies com objetivos tribológicos é uma tecnologia produtiva que tem se destacado como um elemento importante na redução de atrito em superfícies para melhorar o desempenho de peças mecânicas sujeitas a intensas solicitações. Várias técnicas de texturização tem sido empregadas para preparar as características geométricas, normalmente de dimensões micrométricas, em superfícies texturizadas, entre as quais se destacam os ataques químicos e a usinagem eletroquímica. Entretanto, a texturização a laser é vista como sendo a mais promissora na confecção de micro ranhuras texturizadas e sua utilização tem evoluído consideravelmente em setores específicos da engenharia, notadamente no setor automotivo.

2.2. Fundamentos do raio laser

A sigla LASER (do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) diz respeito a amplificação da luz por emissão estimulada da radiação que Albert Einstein, em 1917, postulou pela primeira vez, de forma teórica, a emissão estimulada. Em 1951, C. H. Townes desenvolveu a primeira possibilidade de aplicação desse fenômeno com a amplificação de micro-ondas, porém a sua confirmação experimental veio pelas mãos do próprio Townes em 1954 (BENEDICT, 1987).

No entendimento do princípio de funcionamento de um laser é necessário se ater a física atômica. Dentro do núcleo de um átomo existem prótons e nêutrons, sendo este rodeado por uma nuvem eletrônica onde estão dispostos elétrons. Sempre que se fornece energia a um átomo, os elétrons procuram novas posições de forma a ficarem em equilíbrio; isto pode corresponder à passagem de uma órbita superior com maior energia. Após a chegada a esse ponto, o elétron tenta voltar para o seu estado inicial e é nessa altura que são liberados os fótons, que nada mais é que a energia absorvida pelo elétron sendo descarregada sobre a forma de fótons. A Figura. 2.1 ilustra o esquema de um dos primeiros tipos construídos. Um cristal de rubi, em forma de barra, é excitado por uma lâmpada a gás. O cristal tem a propriedade de excitação metaestável, e, portanto a estimulação ocorre em cadeia.

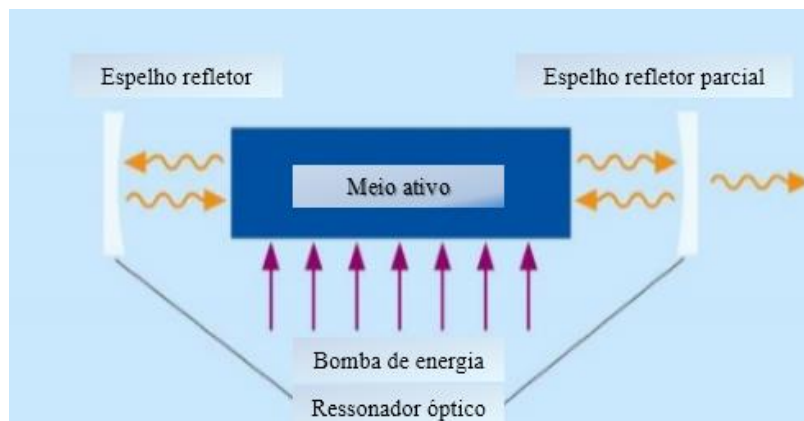


Figura 2.1 – Princípio de funcionamento
Fonte: Adaptado de Photonics (2013)

A utilização do laser no processamento de materiais começou a ser explorado na segunda metade do século XX e, a partir de então, tem se difundido de forma acentuada, tornando-se objeto de inúmeras pesquisas em áreas variadas, tais como, medicina, odontologia, indústria, comércio, entre outras, sendo, uma inesgotável fonte de estudos científicos. Os diferentes tipos de laser dependem do composto existente no meio ativo.

2.2.1. Princípios de operação

A Figura 2.2 mostra de forma esquemática a configuração de um sistema laser com os seus devidos componentes.

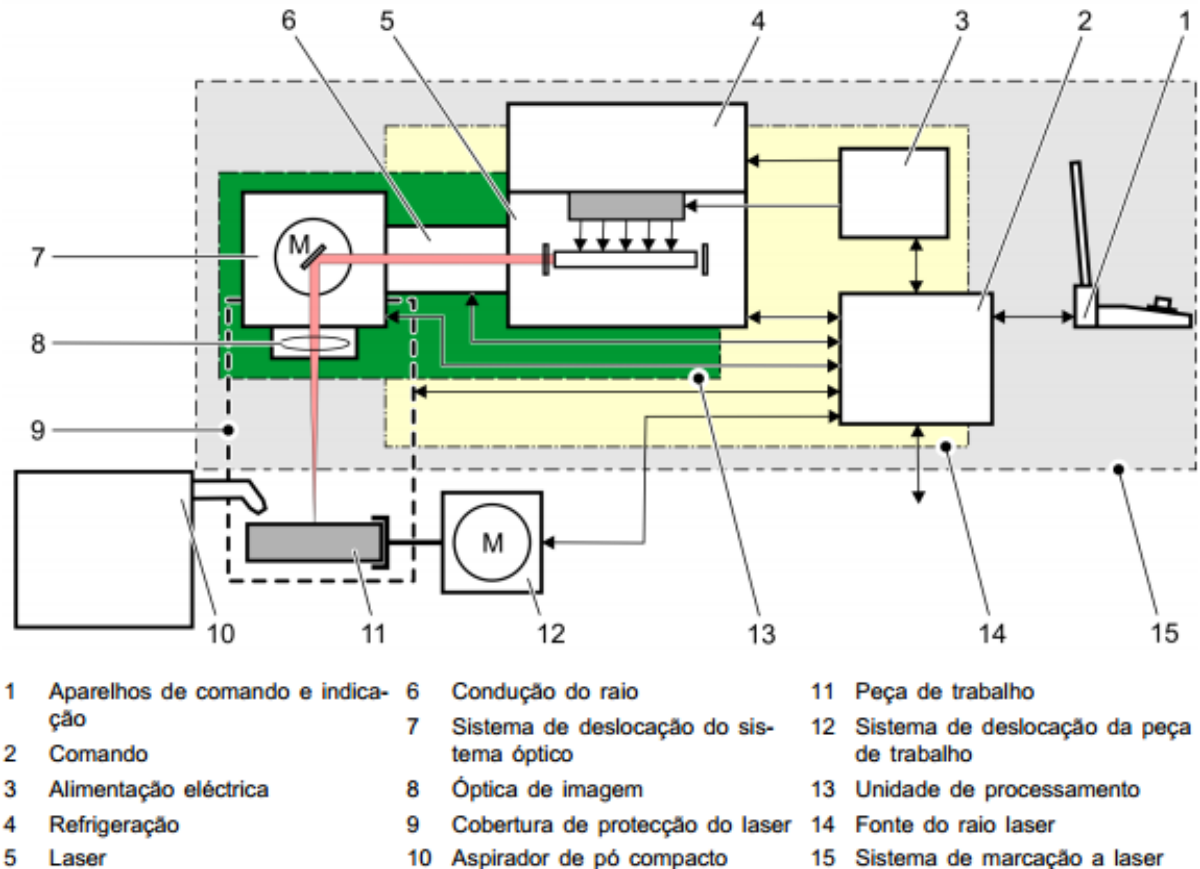


Figura 2.2 – Estrutura de um sistema laser
Fonte: Trumpf (2013)

De forma geral, para a geração de um sistema laser são necessários três elementos fundamentais, os quais são retratados na Figura 2.3:

- Meio ativo (3), podendo ser sólido, líquido ou gasoso onde é gerada ou reforçada a luz laser.
- Bombeamento ou fonte de excitação (2), sendo que estas alimentam o meio laser (3) com energia necessária para o reforço da luz. Uma parte da luz abandona o ressonador óptico através do espelho de saída (4) e está disponível como raio laser (5). A fonte de excitação pode ser eléctrica, química ou óptica constituída por uma fonte de energia permitindo bombear átomos desde o nível fundamental ao nível excitado.
- Cavidade ressonante: Alinhados por dois ou mais espelhos (1,4) a partir do alinhamento refletem o feixe de luz para frente e para trás de modo a armazenar a

energia e permite a oscilação de fótons a ser emitidos através do processo de emissão estimulada, elevando o nível de energia.

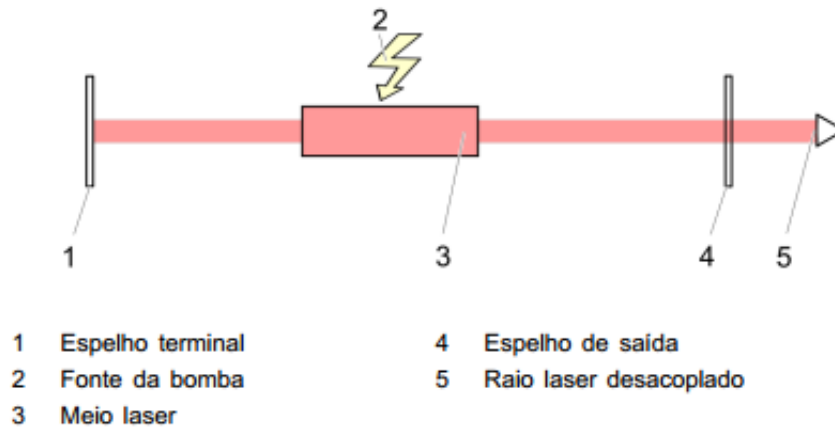


Figura 2.3 – Princípio de operação do laser
Fonte: Trumpf (2013)

Dependendo do meio laser utilizado, é possível distinguir entre laser fixo, líquido e a gás. Considerando a geometria do meio laser, nos lasers fixos distinguem-se entre lasers de barra (os lasers fixos em sentido restrito), lasers de discos e lasers de fibras.

- a. **Laser gasoso:** Os lasers do tipo gasoso operando na faixa do infravermelho são excitados por uma descarga elétrica no interior de um tubo adequadamente pressurizado que contenha o meio ativo (Figura 2.4), sendo que para este tipo o gás CO_2 é um dos mais eficientes.

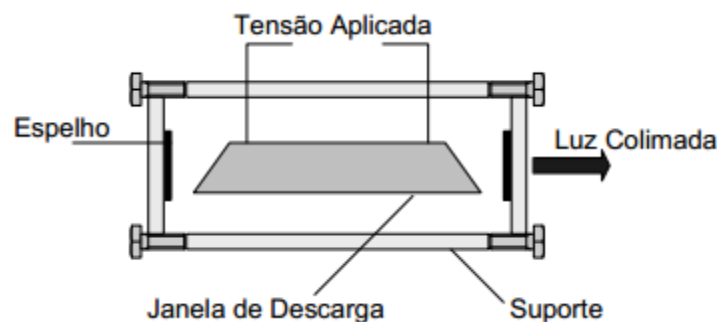


Figura 2.4 – Estrutura de um laser gasoso
Fonte: M. Csele (2004)

- b. **Laser de estado sólido:** Os lasers de estado sólido utilizam meios sólidos para a emissão de fótons. Esta forma especial do laser fixo é designada como laser de barra. Dentre os lasers de estado sólidos utilizados destacam-se os de rubi e a base de neodímio. Destes, os mais eficientes são a base de neodímio, como o laser Nd:YAG, sendo estes os normalmente utilizados em texturização e marcação. A Figura 2.5

mostra, de forma esquemática, alguns detalhes dos componentes e da estruturação do meio ativo.

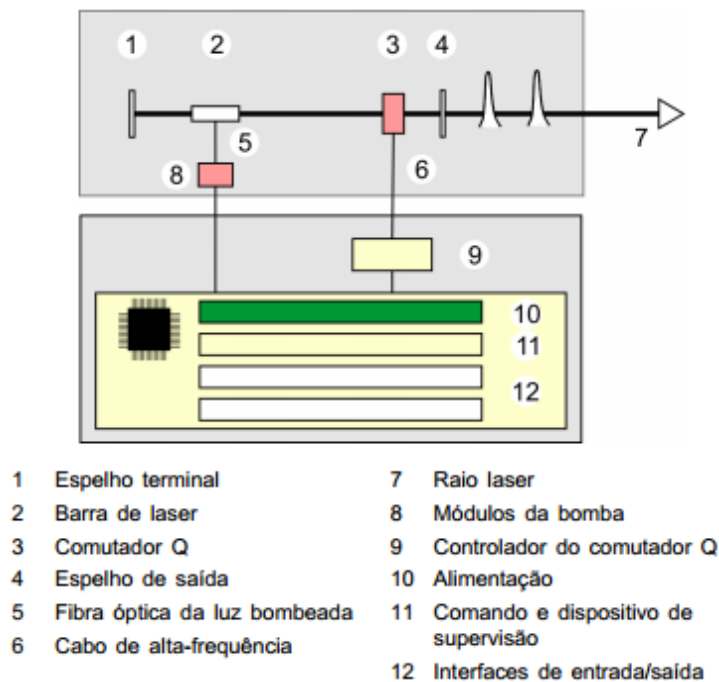


Figura 2.5 – Estrutura do sistema de marcação a laser
Fonte: Trumpf (2013)

- c. **Laser semiconductor:** É excitado pela corrente elétrica que flui através da junção e o meio ativo é composto de material semiconductor. Este tipo de estrutura apresenta uma cavidade ressonante e, por ser de baixo custo e de volume reduzido, é considerado como sendo o mais popular dentre os vários tipos. Os diodos do laser desempenham um papel especial nos lasers onde o meio ativo é um semiconductor. Ao contrário a outros lasers fixos, os lasers de diodos não são bombeados opticamente através de uma fonte de luz, mas sim elétrica e diretamente através de corrente elétrica. A Figura 2.6 mostra de forma esquemática os componentes de um laser semiconductor.

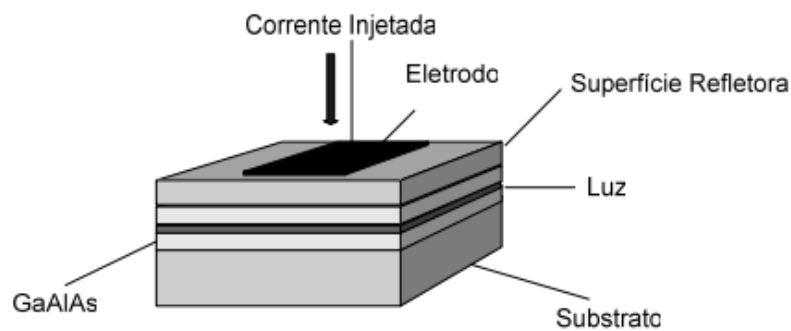


Figura 2.6 – Estrutura de um laser semiconductor
Fonte: Csele (2004)

No que concerne ao seu modo de operação, nos sistemas a lasers são diferenciados os seguintes modos:

- **Funcionamento cw**, também designado como modo contínuo (*continuous wave*).
- **Funcionamento cwm**, também designado como modo contínuo modulado (*continuous wave modulated*).
- **Funcionamento pulsado.**

Dentre os modos de operação, o pulsado é o mais usado sendo possível obter uma elevada quantidade de energia num espaço de tempo extremamente curto. Neste modo, o raio laser opera sob a forma de impulsos muito curtos com potência de pico dos impulsos muito elevada. Para a criação de impulsos muito pequenos são utilizados processos muito distintos. O método mais simples baseia-se no funcionamento pulsado da fonte de energia. Na maioria das vezes, este método tem a desvantagem de uma aceitação nítida da potência média. Devido às interrupções do processo de bombeamento é aplicado menos energia para o meio laser. A potência de pico dos impulsos e a potência máxima dentro de um impulso apenas se encontram minimamente acima da potência média do modo contínuo modulado. O modo de operação pulsado varia em função do tempo, isto é, pode haver geração laser num certo momento e em seguida este ser desligado. Neste tipo de funcionamento normalmente se utiliza um dispositivo denominado *Q-Switch* que atua como um atenuador elétrico e consiste em na atuação na cavidade ressonante de tal modo a impedir a formação do feixe enquanto a inversão de população aumenta. Quando é obtido o nível de energia desejado o *Q-Switch* é ajustado para as condições favoráveis para a geração do feixe laser. Esta técnica permite pulsos de potência elevadíssima e de alta duração, porém tem a desvantagem de demorar muito tempo para obter esses mesmos picos de energia. a Figura 2.7 mostra, de forma esquemática, este tipo de modo pulsado.

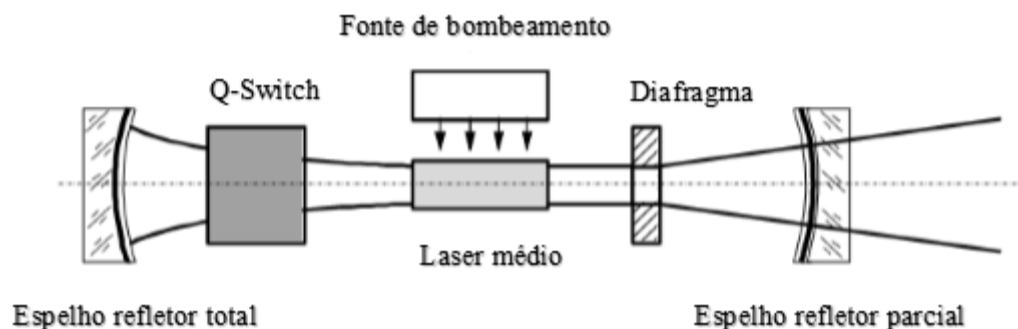


Figura 2.7 – Fonte do laser com Q- Switch
 Fonte: Adaptado de Trumpf (2013)

Em outros modos, a fonte de energia é continuamente operada e a radiação laser é exclusivamente emitida sob a forma de impulsos laser curtos. Nas pausas entre os impulsos laser curtos, é armazenada muita energia para o reforço dos impulsos o que explica a sua

potência de pico. Em caso de durações típicas de impulso no âmbito de alguns nano segundos são obtidas potências de pico dos impulsos que excedem a potência média em mais de um fator.

A partir dos módulos de bomba na área eletrônica, a luz bombeada é encaminhada através de fibras ópticas e espelhos defletores no ressoador (1) do laser, conforme detalhes mostrados na Figura 2.8. No ressoador é criado o raio laser (2) e conduzido na área óptica da cabeça laser. Graças a expansão do feixe regulável (3) e através da unidade de deflexão (7, 8) com óptica de imagem, o raio laser chega à peça de trabalho com a unidade do obturador (4) aberta. Com a unidade do obturador (4) fechado, um espelho deflector (5) conduz o raio laser no transdutor de para a medição da potência (6). Como foco central deste trabalho de pesquisa, o meio ativo a ser abordado é do tipo sólido, mais especificamente utilizado para o uso industrial em gravação de metais, vidros, madeiras etc.

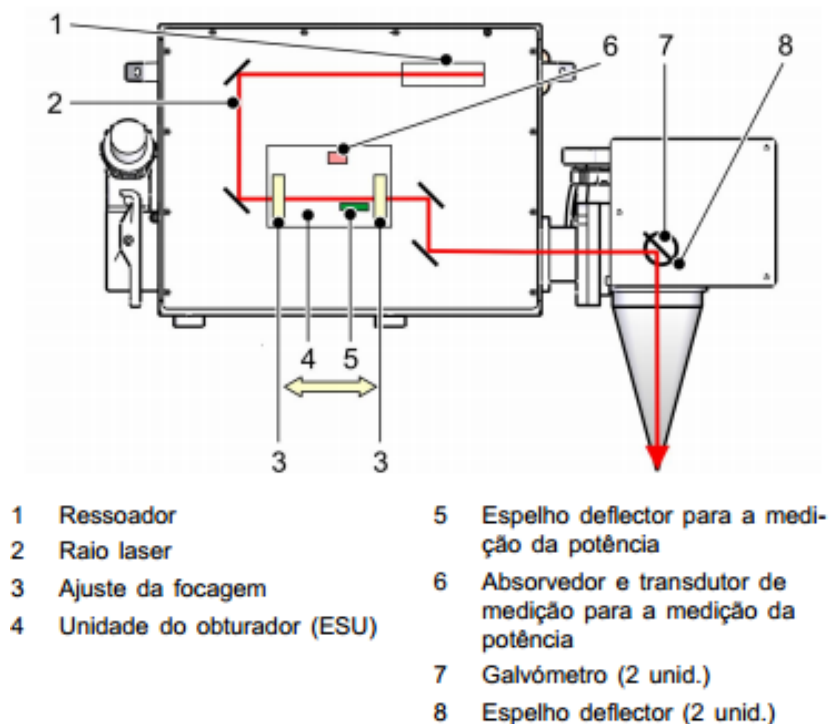


Figura 2.8 – Estrutura do sistema de marcação a laser
Fonte: Trumpf (2013)

2.2.2. Laser para texturização de superfícies

No sentido de obter superfícies com detalhes topográficos visando aplicações específicas, alguns processos de fabricação podem ser utilizados. Dentre estes processos a usinagem eletroquímica, jato abrasivo, estampagem, gravação em relevo, gravação mecânica ou gravação a água são citados na literatura como possíveis alternativas na confecção de perfis geométricos em superfícies texturizadas. Entretanto a texturização a laser é sem dúvida o método mais utilizado e aquele que encontra os maiores desafios para suas aplicações neste campo da engenharia.

A texturização a laser na sua evolução torna-se complexa a caracterização superficial exata devido principalmente à escassez de parâmetros (YU, WANG e ZHOU; 2010). Neste campo de aplicação tecnológica, o laser Nd: YAG (Cristal iônico de alumínio e ítrio dopado com neodímio) é o laser de estado sólido mais utilizado possuindo ótimas qualidades ópticas além de ser termicamente condutivo. O íon de Nd^{3+} produz uma emissão muito forte de radiação quando dopante em um cristal de estado sólido a um comprimento de onda de $\lambda=1,06 \mu\text{m}$ situado no infravermelho. A Figura 2.9 mostra o comprimento de onda típico (expresso em nanômetros (10⁻⁹m)) para este tipo de aplicação do laser.

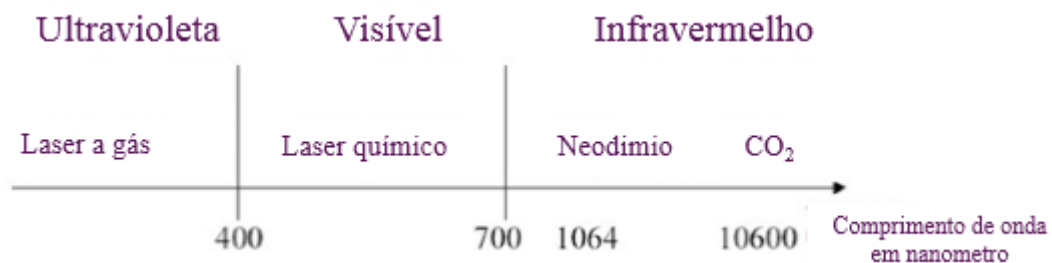


Figura 2.9 – Relação entre os tipos de laser e comprimento de ondas.
Fonte: Adaptado de Trumpf (2013)

De forma geral a utilização do laser apresenta uma série de características específicas bem como uma vasta possibilidade de confecção de geometrias aplicáveis a diferentes materiais, conforme se pode perceber pelo descrito no quadro 2.1. Adicionalmente observa-se que a utilização do laser pode resultar na redução de manutenção e obtenção de economias em função da extensão da vida útil e aumento da eficiência dos componentes bem como pelo incremento nas possibilidades de desenvolvimento de superfícies com características especiais.

Quadro 2.1 – Características do processo de gravação.

Característica	Geometria e Material
Alta flexibilidade	<p>Qualquer geometria pode ser marcada</p> <p>Sem ferramentas, com mínima influência no material.</p> <p>Material:</p> <p>Cerâmicas, metais e plásticos</p>
Alta qualidade e repetibilidade	
Processo sem contato	
Integração descomplicada em ciclos de manufatura totalmente automatizados	
Diversidades de materiais processados	
São possíveis marcações finas (Até 0,03mm)	
Marcações de grandes áreas	
Acesso a pontos difíceis	
Altas velocidade de marcação	
Ambiente seguro	

Fonte: Trumpf (2013).

Entretanto, no sentido de conseguir atingir as vantagens anteriormente citadas, alguns cuidados importantes na aplicação do laser em texturização de superfícies devem ser tomados em relação à geometria da peça, custo do procedimento de texturas, desenvolvimento de rebarbas ou distorções a partir das tensões térmicas bem como na qualidade desejada na superfície durante a aplicação. A qualidade do material varia, dependendo da aplicação, do material utilizado e da habilidade do operador.

Com isso, o processo de texturização ocorre de forma que as geometrias desejáveis possam estar em regiões previamente definidas onde a região de interesse seja recoberta pela deflexão do feixe, como mostrado na Figura 2.10. O formato depende da definição correta dos parâmetros durante a aplicação da textura e do correto procedimento empregado.

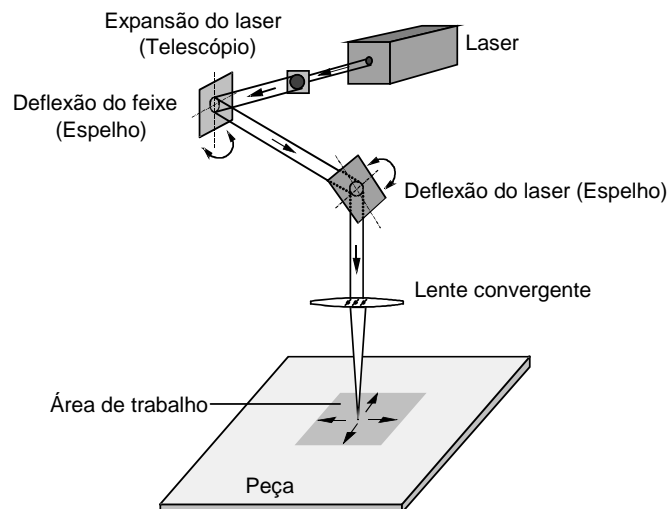


Figura 2.10 – Princípio de operação do laser para texturização.
Fonte: Trumpf (2013).

O laser por ser um equipamento polivalente que oferece soluções originais e competitivas, continua a estimular o desenvolvimento de novas aplicações, como texturização de superfícies diversas com aplicações nas mais variadas áreas (SCARAGGI et al., 2012). Como afirmado anteriormente, a texturização é a forma mais adequada de melhorar o desempenho de superfícies sujeitas a intenso atrito.

2.2.3. Influência dos parâmetros laser aplicado em texturização

Entre os principais parâmetros do laser aplicado em texturização destacam-se a potência do laser, velocidade de deflexão dos espelhos, pulso e frequência, duração do pulso e pico de potência, diâmetro do laser e distância focal, qualidade de geração do laser e o tipo de remoção de camadas e o laser utilizado. Com o aumento do interesse industrial, cresce a necessidade por investigações científicas que permitam elucidar e melhor compreender os fenômenos que envolvem o respectivo processo. Sendo assim, tais observações colocam os parâmetros do laser como uma linha de pesquisa atual e de relevância científica. A Tabela 2.1 ilustra, em uma pesquisa bibliográfica, os principais parâmetros analisados por alguns trabalhos mais relevantes na área. A Figura 2.11, ilustra de forma gráfica o resumo dos parâmetros analisados sob esta ótica em aplicações citadas na literatura para a área de texturização a laser.

Tabela 2.1 – Parâmetros do laser estudados nas pesquisas anteriores

Referências	Parâmetros do Laser utilizados										Tipo de laser / Remoção / Material				
	Distância (mm)	Potência (Kw)	Velocidade (mm/s)	Frequência (KHz)	Energia Pulso (MJ/cm ²)	Pulso (ms)	Impulso frequência (mm)	Pulso (ms)	Fluência (MJ/cm ²)	Focal (cm)	Ponto com diâmetro (mm)	Laser 800 nm	Laser ND:YAG 1064 nm	Tipo de remoção	Material
VILHENA, L.; SEDLACEK, M. ODGORNIK, 2009		x	x	x	x	x							x	Ablação	100Cr6 steel
SHIN, H. CHOI, S. KIN, 2009	x	x	x	x										Ablação	SCM 440H
LAMRAQUI, A.; COSTIL, S. LANGRADE, C. 2010	x	x	x	x				x					x	Ablação	Al 2017
DING, Q.; WANG, L. WANG, Y. 2010	x		x	x		x							x		Ti-6Al-4V
PAITAL, S.; SAMEER W. HE, DAHOTRE, N. 2010	x	x	x	x									x		INOX,PVD
IANG, J.; XUE, L. WANG, S. 2011	x	x	x					x							AISI 1045 steel
HSIAO, W. TSENG, S. HUANG, D. 2011		x		x	x	x	x	x					x		
CHEN, C.; CHUNG, C. WU, B. 2012	x	x	x	x	x		x		x	x	x		x	Ablação	Ti-6Al-4V
VANCONI, L. DEMIR, A. PREVITALI, B. 2012	x	x	x		x	x						x	x	Ablação	
HU, T.; HU, L. DING, K. 2012	x	x	x	x									x		TiN and WC/C
Ocorrência	8	9	9	8	4	4	2	3	1	1	1	1	8	5	
Porcentagem	80%	90%	90%	80%	40%	40%	20%	30%	10%	10%	10%	10%	80%	50%	

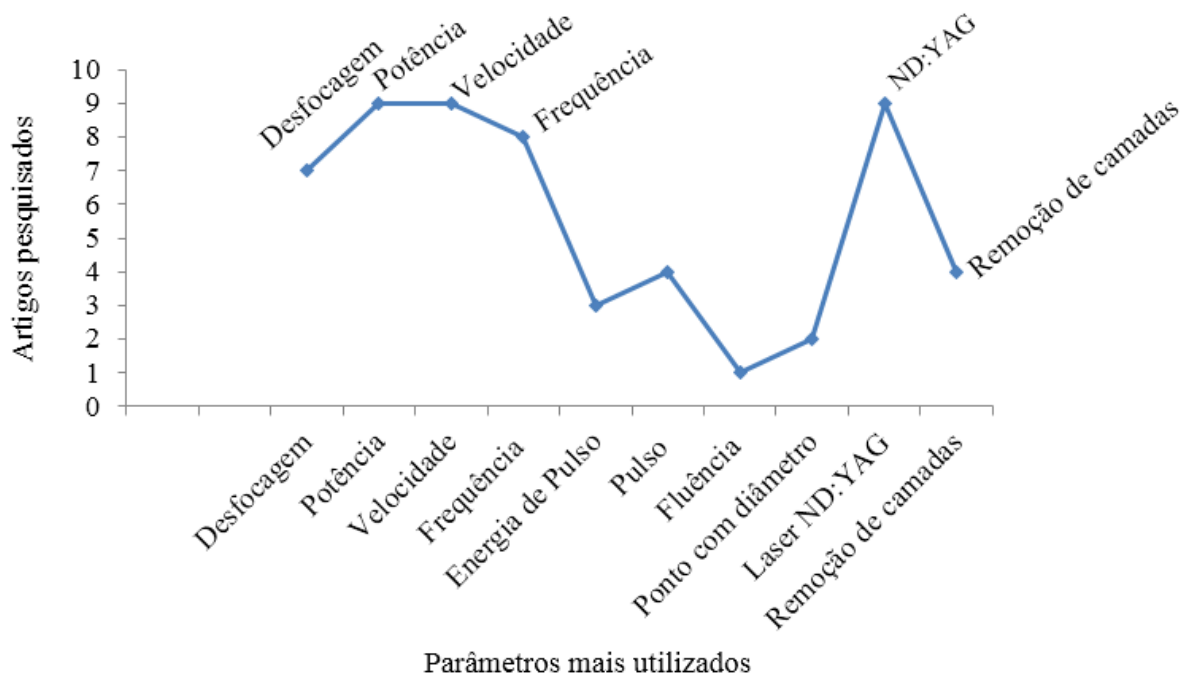


Figura 2.11 – Parâmetros utilizados de acordo com pesquisas relacionadas à texturização de superfícies.

Estes resultados mostram que a potência, a velocidade de deflexão dos espelhos a frequência e a desfocagem em relação a peça se caracterizam como parâmetros importantes para o emprego da texturização e serão melhor caracterizados a seguir. Os parâmetros considerados por quase todos os trabalhos analisados é uma referência baseado em pesquisas diretas realizadas do manual indicado pelo equipamento utilizado neste projeto.

A potência do laser (potência elétrica), através da qual a fonte de luz bombeada do laser é alimentada, define fundamentalmente a potência média do raio laser emitido. A energia de impulsos resulta da capacidade de bombeamento e da frequência da cadência dos impulsos. A potência de pico dos impulsos e a energia de impulsos determinam a intensidade com a qual o raio laser atua sobre o material. Nos diversos processamentos pode-se aumentar o efeito pretendido, aumentando a potência do laser. Correspondentemente, o efeito será inferior com uma potência mais reduzida. Como caracterização do mencionado pode-se citar como exemplo a gravação por remoção, marcação superficial com mudança de cor e remoção de camadas.

A velocidade indica quão rápido o raio laser focado é emitido através da superfície da peça de trabalho (mm/s), determinando a duração do processo. A velocidade de deflexão define também durante quanto tempo o raio laser atua num ponto definido da peça de trabalho. Havendo uma qualidade exigida em termos de marcação, existe um limite máximo para a velocidade de deflexão.

A frequência dos impulsos é determinada pelo sinal, através do qual em sistemas com comutação Q, são operados por impulsos. Em caso de um ajuste fixo, se a potência laser, a velocidade de deflexão e a duração do impulso forem definidas de modo fixo, o aumento da frequência dos impulsos provoca diminuição da potência aumento da densidade dos pontos ou da sobreposição dos pontos no percurso. A Figura 2.12 ilustra a sobreposição dos impulsos, frequência dos impulsos, diâmetro do raio e velocidade de avanço. Esta sobreposição dos impulsos pode ser determinada pela [equação 2.1]:

$$O = \frac{1 - v}{D * F} \quad (2.1)$$

Onde:

D - Diâmetro do raio na peça de trabalho;

F - Frequência da cadência dos impulsos;

O - Sobreposição dos impulsos;

V - Velocidade de avanço do raio laser na peça de trabalho (velocidade de deflexão).

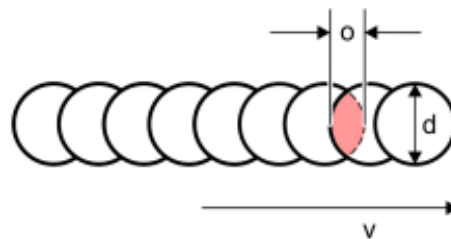


Figura 2.12 – Sobreposição dos impulsos, frequência da cadência dos impulsos, diâmetro do raio e velocidade de avanço

Fonte: Trumpf (2013)

A duração do impulso determina em que período a energia de impulsos é distribuída. Um aumento da duração do impulso leva a uma redução da potência de pico dos impulsos. Em determinados sistemas de oscilador - amplificador, a duração do impulso pode ser ajustada independentemente dos outros parâmetros laser. Isto não é possível em sistemas típicos com comutação Q.

Os dispositivos a laser permitem que o posicionamento de foco seja alterado verticalmente em até +/- 60 mm a partir da distância de trabalho indicado pelo fabricante do laser conforme (Quadro 3.2), manter a distância de trabalho assim, obterá resultados de marcação capazes de serem reproduzidos, com a melhor qualidade possível possibilitando que efetue uma marcação rápida de peças de diferentes alturas e com alta qualidade em um processo de texturização por laser. Para fazer isso, o trabalho na superfície da peça deve ser sempre na posição correta, ou exatamente no foco, ou para alguns aplicativos *defocus* seletivamente. Por esta razão, o laser utilizado nesta aplicação é equipado com uma bateria interna ajuste do ponto focal, capaz de mover a posição do foco verticalmente. Em todas as

fases da marcação, Este componente óptico altamente dinâmico garante uma ótima alimentação entrada em qualquer posição de marcação, para produzir laser homogêneo marcação a Figura 2.13, ilustra o ajuste do ponto focal a partir da distância de trabalho.

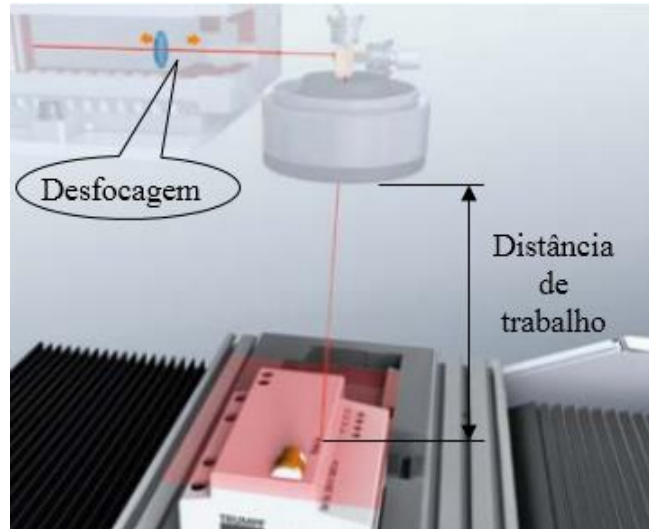


Figura 2.13 – Ajuste do ponto focal

Fonte: Trumpf (2013)

O mecanismo de ajuste óptico do ponto focal (1), que permite a marcação de níveis diferentes de altura na peça de trabalho sem fisicamente mover a cabeça de laser ou a peça de trabalho. O feixe de laser passa pelo mecanismo de ajuste do ponto focal e é ajustado para a superfície da peça de trabalho através de dois espelhos móveis (2), em seguida é desviado pelo espelho (3) nas direções X e Y. A lente (4) focaliza o feixe da peça de trabalho (5) para processamento. A Figura 2.14 ilustra o mecanismo de ajuste de ponto de foco interno.

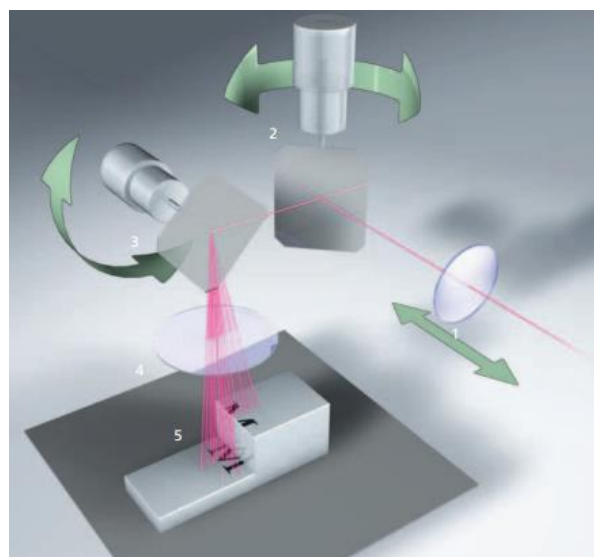


Figura 2.14 – Mecanismo de ajuste de ponto de foco interno

Fonte: Trumpf (2013)

- 1- Mecanismo de ajuste do ponto focal
- 2- Espelhos refletores
- 3- Espelho refletor frontal
- 4- Lente focal
- 5- Feixe da peça de trabalho

O campo de marcação é calibrado na distância de trabalho qualquer alteração da distância de trabalho através do ajuste da posição de focagem (\pm) provoca uma alteração na barra de medida desse modo, uma alteração da dimensão do campo de marcação ($\leftarrow \rightarrow$). Esse efeito ocorre especialmente em lentes de campo planas padrão. Em lentes de campo planas telocêntricas, esse efeito é claramente reduzido. A Figura 2.15 ilustra o ajuste da distância de trabalho através do deslocamento da posição da desfocagem.

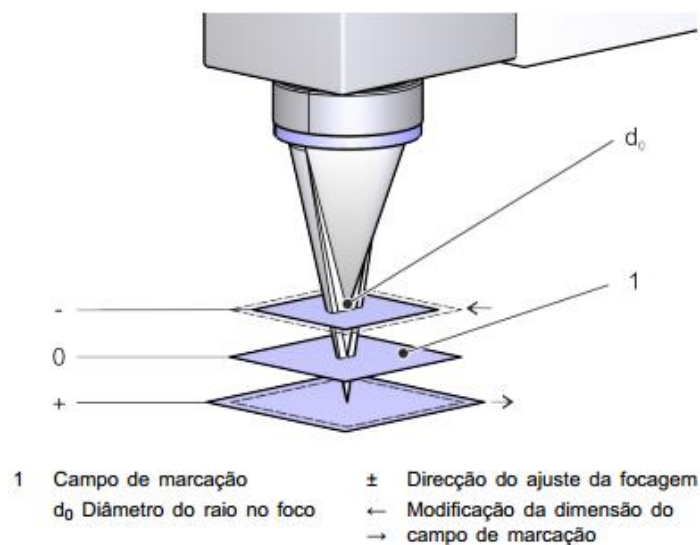


Figura 2.15 – Distância de trabalho e deslocamento da desfocagem

Fonte: Trumpf (2013)

2.3. Revestimentos de superfícies em anéis e seus impactos

Em determinados setores tecnológicos a melhoria de superfícies através da aplicação de revestimentos é de fundamental importância para o aumento da resistência superficial, e conseqüentemente, a durabilidade dos produtos. Este é o caso da utilização de anéis de pistão aplicados em motores direcionados para o setor automotivo. Dentre as técnicas de aplicação

de revestimento, a denominada por “PVD” (*Physical Vapor Deposition*) tem a capacidade de gerar camadas de revestimento mais finas do que as executadas por Deposição por Spray Térmico (*Thermal Spray*). Dentre os materiais usados para esta técnica no setor de aplicação relacionado a este trabalho de pesquisa, se destacam o nitreto de titânio e o nitreto de cromo.

Atualmente, em diversos motores, duas grandes famílias de materiais são utilizadas em anéis de pistão. A primeira é a de Ferro fundido (Nodular ou Lamelar) e a segunda é a de Aço (carbono temperado revenido ou inoxidável com cobertura em PVD).

Antes os anéis de pistão eram “circulares” e a força que eles faziam contra a parede do cilindro era dada por deformação térmica. Com a evolução dos motores, cada vez mais potentes e sofisticados, houve um aumento na rotação dos anéis, o que provocou alguns problemas no funcionamento, tais como flutuação e perda de carga. Isso fez com que o pacote de anéis sofresse algumas modificações, evoluindo simultaneamente com os motores.

A partir da primeira crise de energia em 1973, o conseqüente acréscimo nos custos dos combustíveis e lubrificantes gerou novas necessidades de uma maior durabilidade e potência, o que colocou o projeto dos anéis de pistão diante de exigências extras, como:

- Melhor vedação;
- Redução do consumo de óleo;
- Maior resistência ao desgaste;
- Redução do tempo de assentamento (amacramento do motor);
- Redução de atrito.

Mais recentemente, com as legislações sobre emissões de poluentes nos vários continentes, surgiram novos desafios com relação a performance e durabilidade dos anéis. Estes desafios estão sendo superados com o aprimoramento tecnológico dos processos de fabricação e o desenvolvimento de novas alternativas de material base, coberturas e perfis dos anéis.

A Figura 2.16 mostra detalhes da representação do anel de pistão, bem como nomenclaturas usuais para os anéis de pistão de acordo com as normas técnicas internacionais.

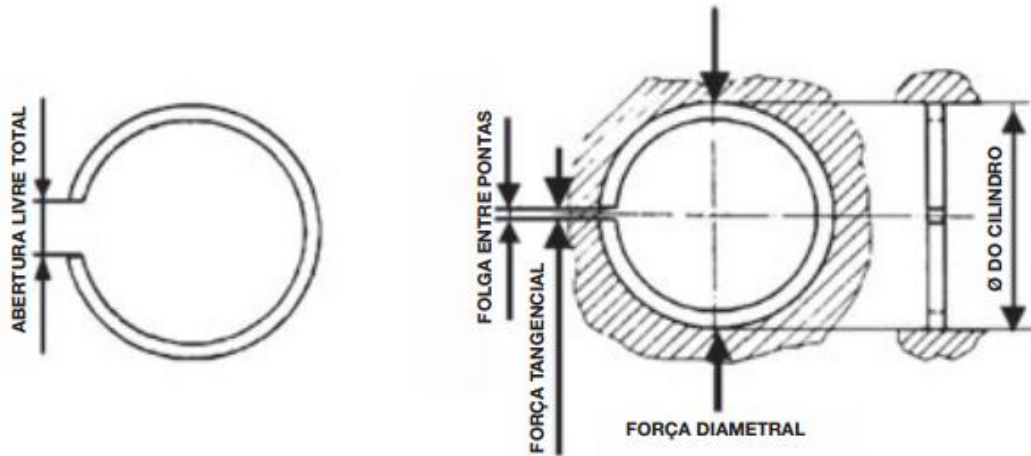


Figura 2.16 – Representação do anel de pistão
Fonte: ISO6621-1 (1984)

Os tratamentos e coberturas superficiais são dispostos nas superfícies do anel onde as solicitações térmicas e mecânicas são mais rigorosas durante seu funcionamento e possuem propriedades específicas que devem ser escolhidas de acordo com a respectiva aplicação do anel. De forma geral, os objetivos de se aplicarem um revestimento sobre a face de contato do anel são:

- Aumentar a durabilidade e reduzir o desgaste;
- Gerar resistência a escoriações, que ocorre quando a temperatura superficial, de uma ou de duas superfícies metálicas em contato, atinge o ponto de fusão do material, permitindo que se desprenda uma pequena quantidade do material em fusão. Isto deixa uma fenda minúscula em uma das superfícies e um depósito firmemente preso (soldado) na outra superfície de contato;
- Proporcionar redução de atrito desde que as coberturas, sob a aplicação de mesma força, produzam menor resistência ao movimento.

A Figura 2.17 compara vários tipos de coberturas e tratamentos superficiais sob uma mesma face de contato do anel e a respectiva resistência ao desgaste. O quadro 2.2 apresenta os tipos de desgaste e suas possíveis causas relacionadas a anéis de pistão. Estes dados se referem ao anel de primeira canaleta que geralmente são expostos a maiores cargas mecânicas.

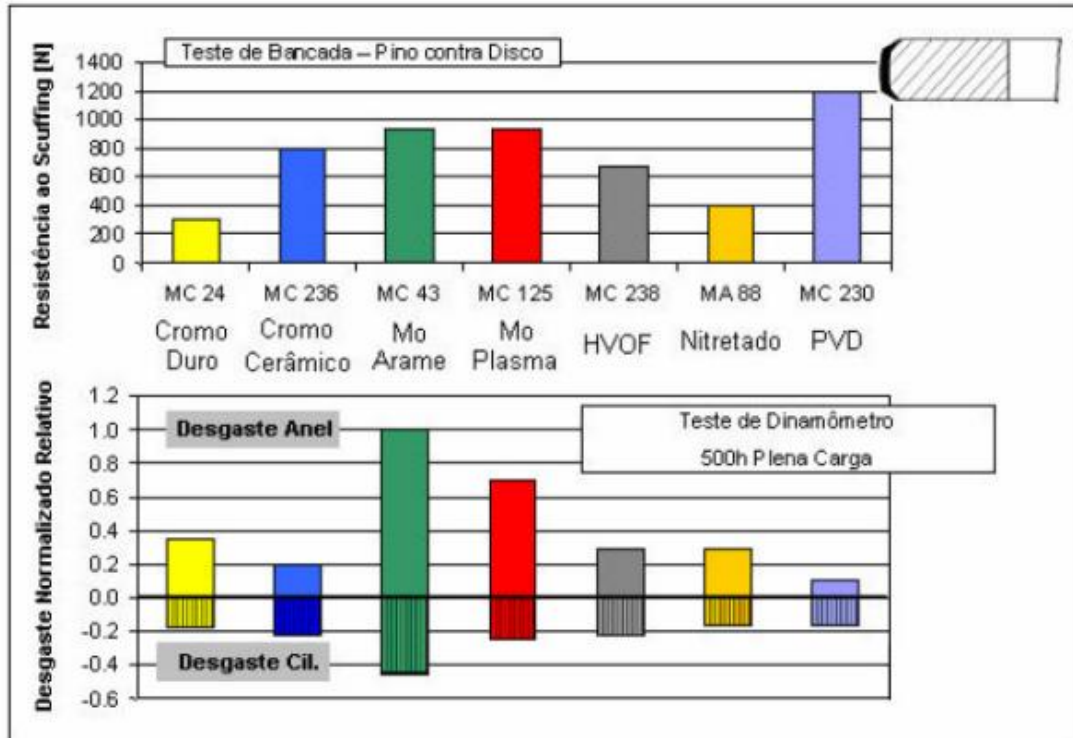


Figura 2.17 – Diferentes coberturas e tratamentos superficiais na face de contato do anel.
 Fonte: Adaptado de: Ferrarese, Rovai (2004)

Quadro 2.2 – Tipos de desgastes para anéis de pistão

Desgaste	Causas
Abrasivo	O movimento progressivo resultante do contato anel-cilindro.
Corrosivo	Baixas temperaturas de operação
Por fadiga de contato	Este desgaste com relação ao contato anel-cilindro é desprezível devido ao baixo nível de tensão de contato. Entretanto deve ser considerado para o contato do par anel-pistão.
Adesivo (Scuffing)	É predominante em sistemas de contato não lubrificados, onde esse tipo de desgaste deve ser considerado para o anel de primeira canaleta, pois esse anel fica exposto às maiores cargas mecânicas na situação de pouca oferta de óleo (ponto morto superior).

Fonte: Vatavuk (1994)

O desgaste do anel-cilindro é relativo ao movimento constante causado pelo atrito entre o anel e a parede do cilindro. Resultados obtidos em diferentes análises mostram que anéis com coberturas a base de PVD - Nitreto de Cromo (CrN), não só apresenta o menor desgaste do anel, mas mantém o desgaste do forro no nível mínimo também. Em cilindros de ferro

fundido perlítico apresentaram a maior resistência ao desgaste comparativamente a outros tipos de cobertura conforme Figura 2.18.

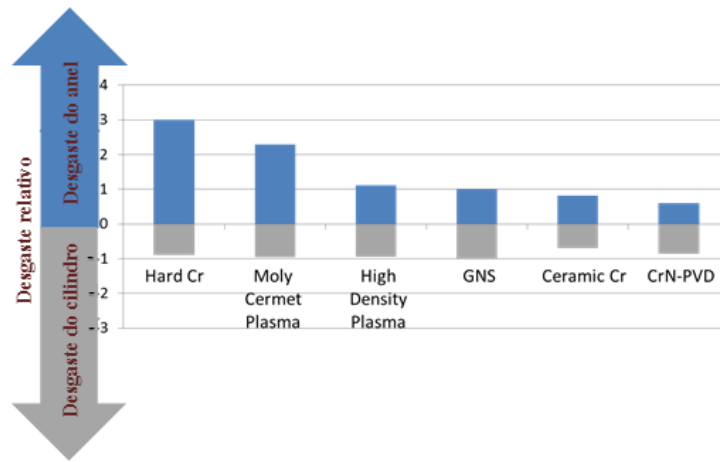


Figura 2.18 – Classificação para revestimentos dos anéis superiores (Motores de ignição comandada).
 Fonte: Adaptado de: Bruno, Faria e Silva (2013)

No projeto do anel de pistão com cobertura em PVD ao ser aplicado uma camada de revestimento de 0,020 a 0,030 (mm) espera-se que o desgaste do anel pelo atrito entre o anel e a parede do cilindro tenha uma durabilidade de aproximadamente 3000 horas como requisito fundamental. A Figura 2.19 relaciona o desgaste pela quantidade de horas em um motor diesel, onde se pode perceber que os anéis nesta faixa de cobertura de PVD apresentaram desempenho superior aos anéis com cobertura de cromo cerâmico atendendo os requisitos para este tipo de aplicação.

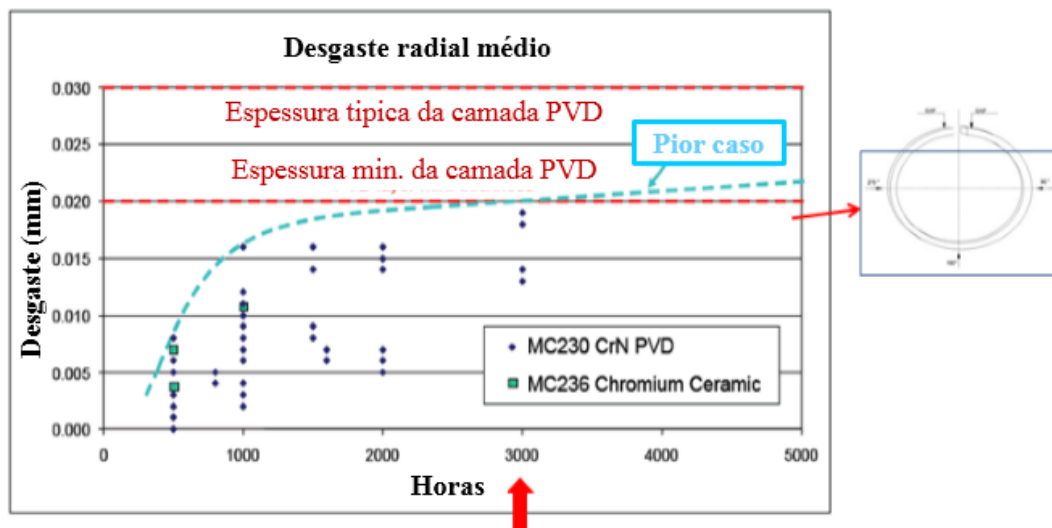


Figura 2.19 – Estimativa de desgaste para anéis de compressão em motores a diesel - Camada PVD vs. cromo cerâmico
 Fonte: Mahle (2013)

Considerando o aspecto físico do anel, o desgaste não ocorre de forma uniforme. Na Figura 2.20 verifica-se que o desgaste do anel de pistão ocorre muito antes das 500 horas de testes sendo evidenciado o desgaste nas pontas dos anéis.

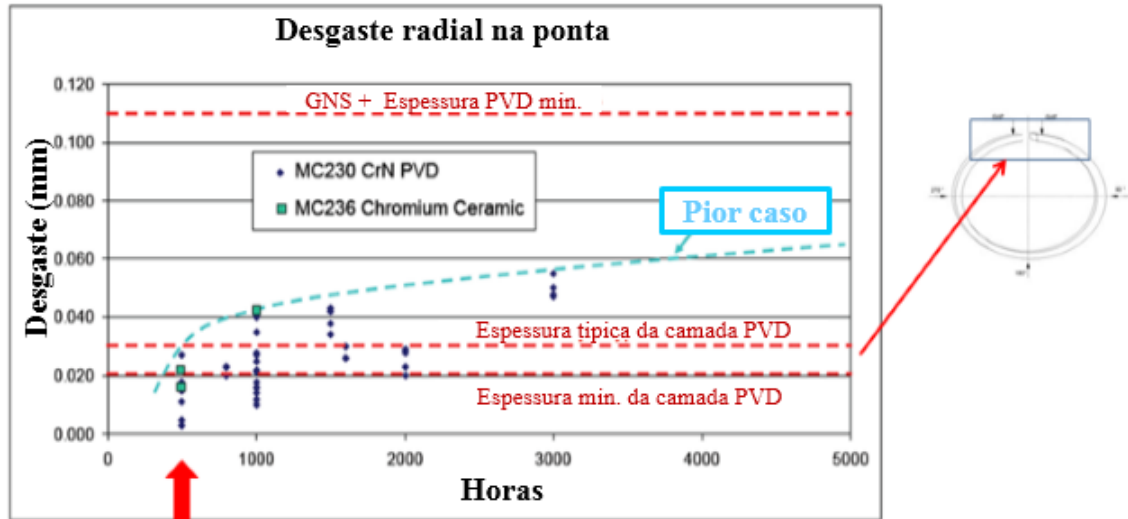


Figura 2.20 – Estimativa de desgaste para anéis de compressão aplicação diesel – Desgaste na região das pontas do anel “Tip wear”
 Fonte: Mahle (2013)

Segundo Tomanik e Ferraresi (2006), a representação da divisão energética entre os diferentes componentes de um motor neste ambiente de avanço tecnológico, mostra que na relação entre a energia necessária para movimentar o veículo e a quantidade de combustível que é queimado, 74% é dado por perdas térmicas, 11% de perdas mecânicas e efetivamente 15% é o que movimenta o veículo. A Figura 2.21 mostra em detalhes a distribuição energética entre os diferentes componentes de um motor de combustão interna, ressaltando assim o desafio na melhoria de aproveitamento energético em desafios futuros visando ganhos de eficiência.

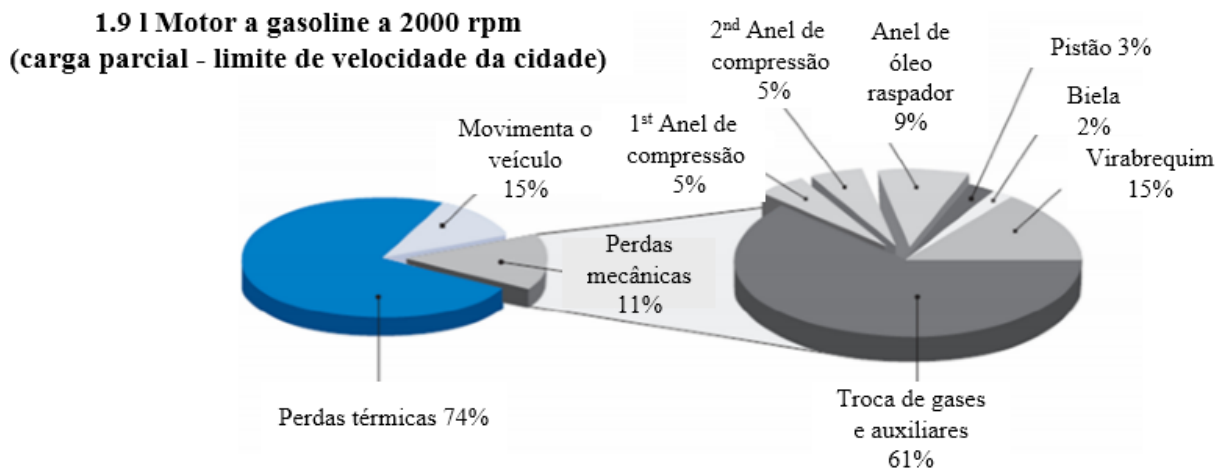


Figura 2.21 – Distribuição energética nos motores de combustão interna
 Fonte: Adaptado de Tomanik e Ferrarese (2006)

Neste conjunto, ao pensar em perdas mecânicas pode-se perceber que existem duas contribuições por parte dos componentes. A primeira refere-se a contribuição direta do componente. Neste sentido, ao se desenvolver um componente que consiga reduzir o atrito e ao mesmo tempo manter o sistema de vedação poderia contribuir diretamente para que a perda mecânica se reduzisse, aumentando assim a potência efetiva. A segunda refere-se a trabalhar de maneira mais eficiente na distribuição primária em termos de combustão que vai demandar dos componentes durabilidades diferenciadas do que existem atualmente.

Os revestimentos de cobertura sobre a face de contato do anel é de fundamental importância para a melhoria de eficiência dos componentes. Os objetivos ao se aplicarem um revestimento sobre a face de contato do anel são definidos de acordo com o desgaste e fenômenos que ocorrem nas superfícies devido ao atrito. Entre estas fontes de atrito destacam-se os de origem abrasivos, por corrosão, além daqueles por desgaste adesivo e por fadiga, (MAHLE, 2013). As Figuras 2.22 e 2.23 ilustram estes mecanismos e seus efeitos superficiais em anéis de compressão.

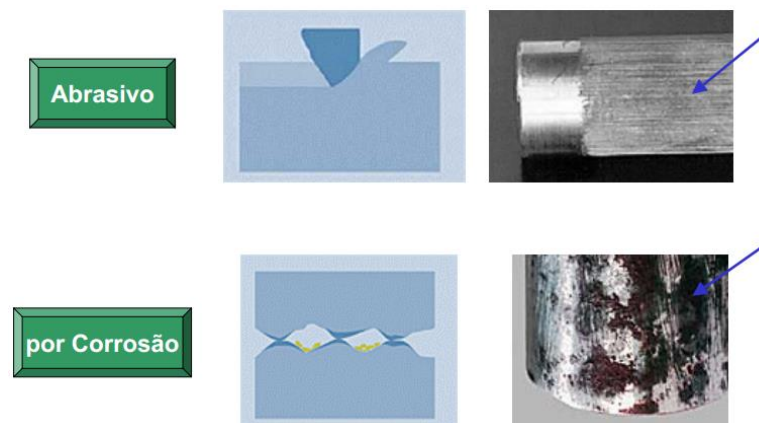


Figura 2.22 – Desgaste abrasivo e por corrosão nas superfícies dos anéis de compressão
Fonte: Mahle (2013)

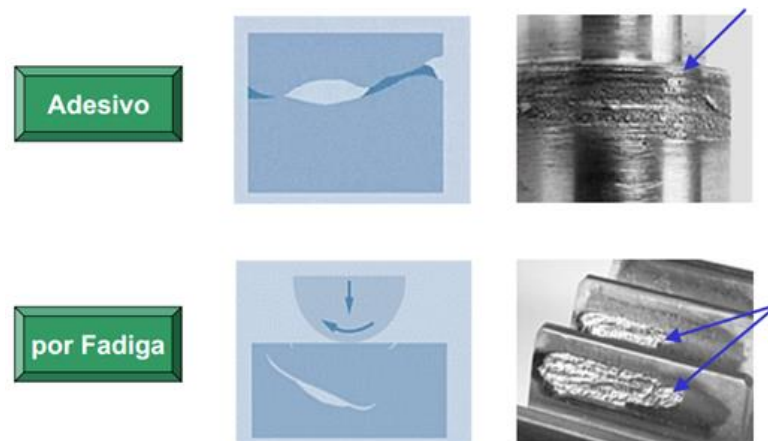


Figura 2.23 – Desgaste adesivo e por fadiga nas superfícies dos anéis de compressão aplicação
Fonte: Mahle (2013)

Dentre os vários tipos de desenvolvimentos observa-se que em aplicações de alta sollicitação, como é o caso de motores diesel HDD (*Heavy Duty Diesel*) e HSD (*Heavy Speed Diesel*) e motores Otto (Flex), uma atenção especial deve ser dada a natureza da cobertura dos anéis. A Figura 2.24 apresenta duas camadas funcionais de *CrN/Gas Nitrided Steel* que possuem excelente resistência ao desgaste e ao engripamento. A cobertura consiste de camada intermediária fina de cromo e camada de deslizamento de nitreto de cromo depositadas por processo PVD. A camada de nitreto de cromo (CrN) apresenta matriz com morfologia contendo micro poros e micro depósitos de cromo puro (MAHLE, 2013). A dureza da cobertura deve apresentar-se de 1200 a 1600 HV, sendo que este nível de dureza é assumido como a média de um mínimo de cinco endentações centradas na espessura da camada.

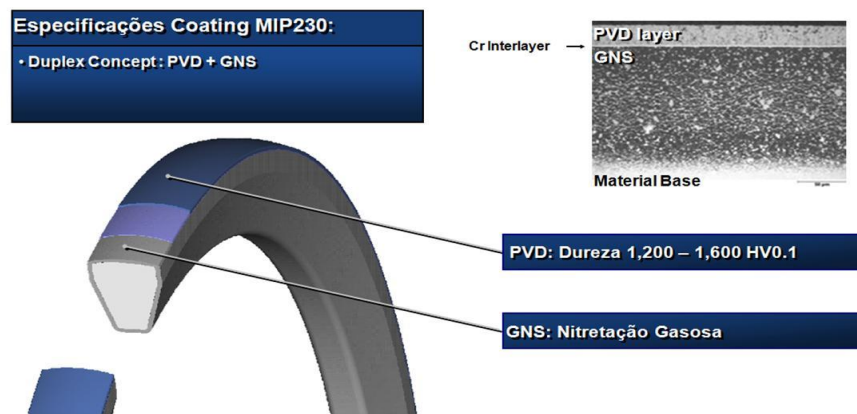


Figura 2.24– Camada superficial de nitreto de cromo aplicado em aço inox
Fonte: Adaptado de Sa & Ferrarese (2011)

Em função do que foi anteriormente exposto, percebe-se que a utilização de cobertura em PVD aplicado aos anéis de compressão apresentam uma série de vantagens relativas a outros tipos de coberturas cromado cerâmico entre as quais se podem destacar:

- Maior resistência ao desgaste;
- Alta dureza (aproximadamente 2x maior do que cromados cerâmicos);
- Melhor resistência à oxidação;
- Baixo atrito para um material cerâmico;
- Favorece a precisão geométrica;
- Boa adesão ao substrato;
- Baixo nível de tensões internas.

2.3.1. Texturização de superfícies e seus efeitos tribológicos

A texturização é uma tecnologia cada vez mais presente em variados campos de aplicações industriais bem como em pesquisas e desenvolvimentos. A análise das pesquisas nesta área mostrou que o interesse industrial e acadêmico pelo processo de texturização a laser vem crescendo nos últimos anos, caracterizando o processo como um tema de pesquisa atual e de relevância científica frente a outros processos industriais. Na última década, estudos foram realizados os quais apontam que esta nova tecnologia afeta significativamente a geração de pressão hidrodinâmica em superfícies submetidos a desgastes por atrito. Entretanto, um dos maiores desafios da texturização de superfícies consiste no ajuste adequado dos parâmetros do processo para se obter a geometria desejada, em outras palavras, o perfil topográfico adequado e isto depende do processo a ser utilizado.

A literatura menciona várias técnicas que podem ser utilizadas para a obtenção de superfícies texturizadas. Entre várias destacam-se a utilização do processo com jato abrasivo (*shot blasting*), eletro-erosão (EDM), *Electrical Discharge Machining*, usinagem eletroquímica (ECM) *Electrical Discharge Machining*, e o laser (LST) *Laser Surface Texturing*. Nakano et al. (2007) descrevem a aplicação do processo com jato abrasivo para a confecção de micro-texturas em superfícies de ferro fundido utilizando granalhas de bronze/fósforo permitindo ganhos substanciais na redução do coeficiente de atrito hidro-dinâmico comparativamente as superfícies planas. Romoly, Rashed e Fiaschi (2014) discutem aspectos comparativos entre os processos de eletro-erosão e laser na confecção de micro-furos em superfícies. Qian et al. (2010) discorrem sobre a capacidade da usinagem eletroquímica (ECM) em confeccionar micro texturas superficiais em aços revestidos com cromo duro mostrando a redução substancial no desgaste por atrito. Na mesma linha Byun et al. (2010) mostram a capacidade do processo micro-ECM em confeccionar micro texturas superficiais em aços inoxidáveis AISI 440C sem provocar danos térmicos e mecânicos e concluem ressaltando a redução substancial no desgaste por atrito obtido com estas texturas.

Entretanto, dentre os processos citados, a texturização a laser é reconhecidamente aquela que apresenta os maiores potenciais de desenvolvimento neste setor tecnológico e será abordada com mais detalhes um pouco mais adiante. Tais aspectos ficam evidenciados nos trabalhos de Romoly, Rashed e Fiaschi (2014) ao comparar o laser com micro pulsos e a eletro-erosão.

A obtenção de um perfil geométrico característico é importante para que o processo permita recobrir uma menor área possível, resultando em economia significativa de materiais

e tempo. De acordo com Hsu (2006), a influência da forma geométrica (circular, elíptica ou triangular) bem como a orientação da aplicação atuam como fatores decisivos na redução de fricção em baixa e alta velocidades sob baixas condições de carga. Stachowiak e Posdsiadlo (2008) discutem os aspectos associados a otimização de superfícies texturizadas, incluindo o perfil topográfico e formato das texturas.

Bai et al. (2012) e Chen et al. (2012) seguem na mesma linha ao mostrar, através de simulações e estudos experimentais, que as formas da textura, orientações e perfis transversais têm influência significativa sobre o desempenho do tribológico de superfícies texturizadas.

Pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos através de simulação e desenvolvimentos experimentais com texturas de superfície conforme ilustrado na Figura 2.25, mostram a importância das formas da textura, acabamento, cuja geometria têm influência significativa sobre o desempenho tribológico (YU, WANG e ZHOU; 2010).

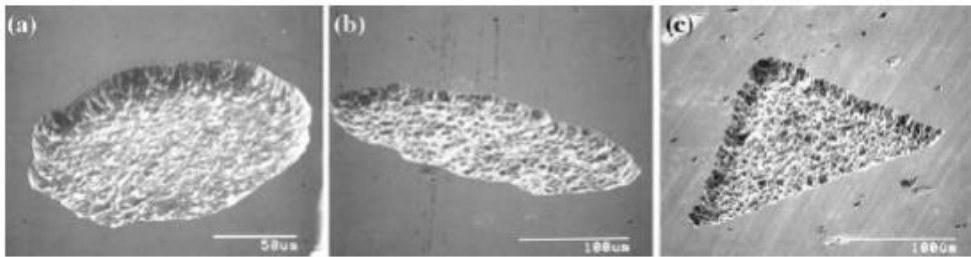


Figura 2.25 – Formas típicas de texturização: (a) circular, (b) elíptica, (c) triangular
Fonte: Yu, Wang e Zhou (2010)

Para ilustrar este aspecto, Podgornik et al. (2012) desenvolveram um modelo através de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para avaliar a mudança de pressão ao longo da cavidade, a influência da profundidade no campo do fluxo e o acabamento do reservatório (*dimples*), conforme mostrado na Figura 2.26. Os autores observaram um comportamento distinto na mudança de pressão hidrodinâmica e a influência positiva de uma maior profundidade no campo de fluxo do óleo lubrificante provocada por um maior *vortex* na cavidade, resultando em uma maior eficiência na redução do atrito. Complementarmente, a ilustração mostrada na Figura 2.27 destaca o objetivo de micro cavidades para diferentes formas de texturas, gerando reservatórios de óleo para melhor lubrificação no contato entre anel e cilindro. Tal descrição quantitativa da topografia das microtexturas (profundidade, rugosidade, largura e comprimento) aplicáveis a diferentes formas de metais ainda carece de maiores desenvolvimentos.

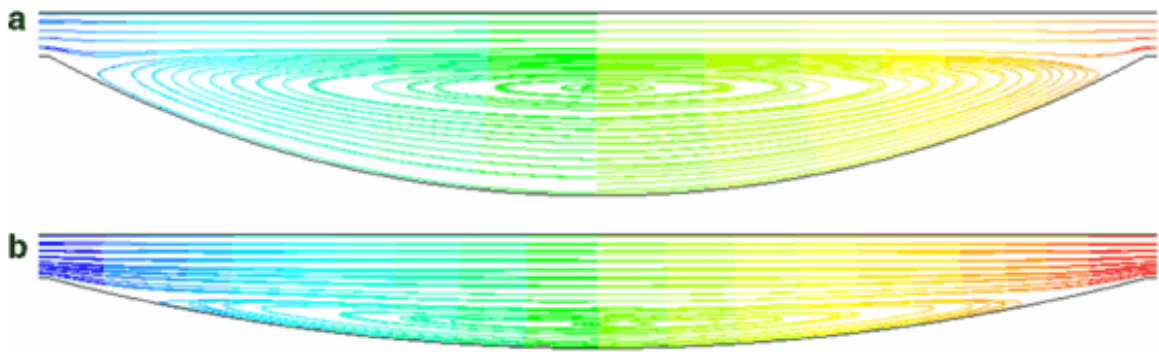


Figura 2.26 – Mudança de pressão ao longo da cavidade e influência da profundidade de cavidade no campo de fluxo

Fonte: Adaptado de Podgornik et al.(2012)

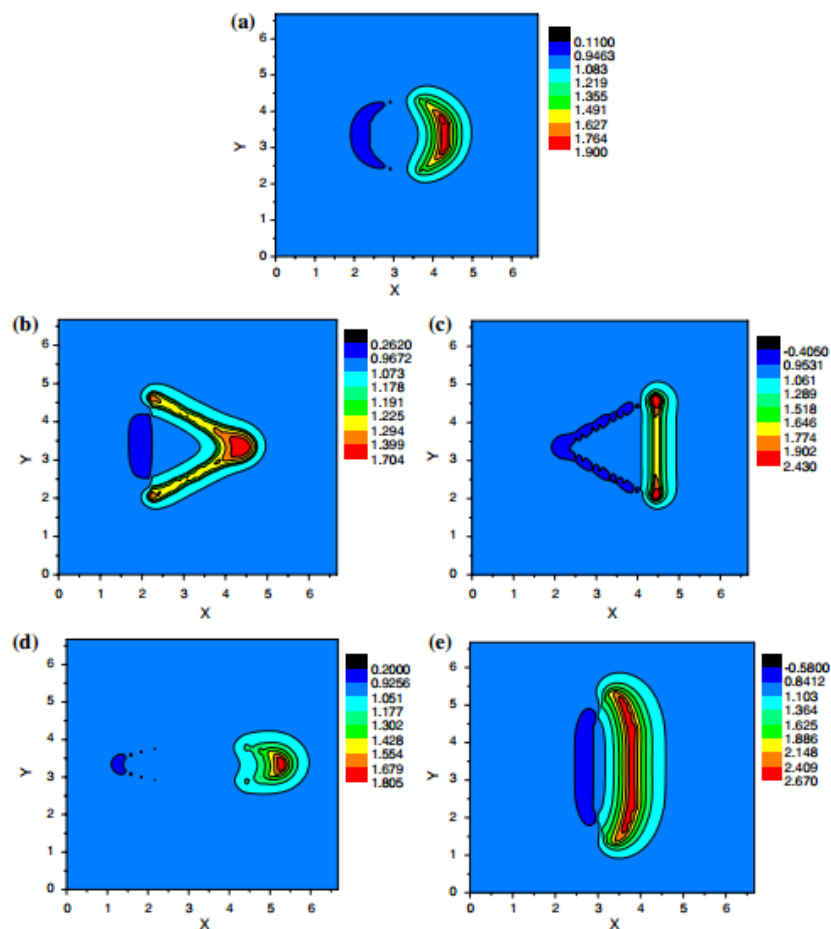


Figura 2.27 – Distribuição de pressão de diferentes formas de texturas e orientações.

(a) Círculo, (b) Triângulo, (d) Elipse, (e) Ellipse

Fonte: Yu, Wang e Zhou (2010)

Diversos estudos foram realizados na última década e uma tecnologia que cada vez mais vem ganhando importância na área de investigação é a texturização a laser. Experimentos e estudos apontam que esta nova tecnologia afeta significativamente a geração de pressão hidrodinâmica. Nesta mesma linha, Scaraggi (2012) discute os mecanismos de redução do coeficiente de atrito em superfícies texturizadas a laser com o objetivo de

melhorar o desempenho em relação ao desgaste em superfícies submetidas ao atrito e afirma que as características geométricas otimizadas permitem a melhoria substancial de desempenho tribológico. No entanto, devido à escassez de parâmetros torna-se difícil e complexo uma categorização onde a texturização a laser encontra-se a dar os primeiros passos para sua evolução (YU, WANG e ZHOU; 2010).

Na Figura 2.28 são apresentadas formas diferentes de *design* aplicadas em texturas a laser com objetivo de servir como reservatórios de óleo, sendo que a principal diferença em relação às aplicações convencionais de texturização diz respeito à geometria das texturas. Os resultados obtidos nos testes, indicaram uma razoável diminuição do coeficiente de atrito segundo Tomanik (2008). Entretanto, segundo Yu, Wang, e Zhou (2010), a criação de cavidades na superfície dos materiais para investigação e aplicação deste conceito, da criação de cavidades na superfície, tem sido motivo de estudo e controvérsia em diversos trabalhos.

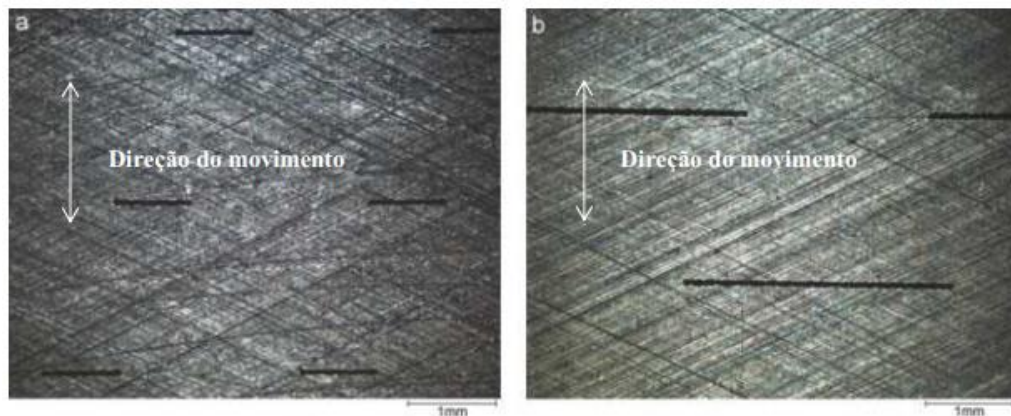


Figura 2.28 – Perfil geométrico de aplicação por laser: a) 1mm b) 3mm
Fonte: Tomanik (2008)

2.3.2. Texturização em anéis com cobertura de PVD

A texturização de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) se caracteriza como uma atividade complexa devido ao fato de que elevados níveis de temperatura e deposição de energia, necessários para provocar a fusão, são alcançados em curto espaço de tempo, podendo tornar o processo instável e dependente de alguns cuidados. Por sua vez, a geometria texturizada bem como o seu perfil topográfico adequado são fundamentais para o armazenamento de uma quantidade adequada de óleo lubrificante que conduza ao mesmo tempo a bons índices de redução de desgaste e atrito.

Considerando os vários tipos de materiais, os anéis de os anéis de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) se mostram como uma das aplicações mais frequentes em motores de combustão interna, em especial motores a diesel, onde as elevadas

temperaturas de combustão exigem utilização de materiais com elevada dureza. Os anéis de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) são utilizados por possuir uma camada com propriedades anticorrosivas conjugada com uma resistência adequada para suportar ambientes sujeitos ao alto desgaste por corrosão. Em motores a diesel esta exigência é ainda maior devido ao desgaste na medida em que superfícies atritadas podem provocar desgastes por abrasão e corrosão. Logicamente como as duas superfícies ao se movimentarem, uma em relação à outra, anel/cilindro ocorrerá o desgaste, sendo que estes pode ser definido como um prejuízo mecânico a uma ou as duas superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Em muitos casos, este desgaste leva a um aumento contínuo da folga entre as partes que se movimentam ou a uma indesejável liberdade de movimento e perda de precisão.

A perda por desgaste de pequenas quantidades relativas de material pode ser suficiente para causar a completa falha dos componentes mecânicos envolvidos, sendo a lubrificação das superfícies a forma mais efetiva de reduzir a fricção e, conseqüentemente, o desgaste superficial. Nesta área de aplicação específica (foco principal deste trabalho), Etsion e Sher (2009) avaliaram o efeito da texturização a laser de superfícies em anéis de motores a diesel sobre o consumo de combustível e a composição do gás de escape, comprovando as vantagens de sua utilização. Por outro lado, Yu, Wang, e Zhou (2010) verificou que o formato das texturas e sua orientação tem influências significativas sobre o desempenho tribológico de superfícies texturizadas. Como resultado, a topografia tridimensional gravado de microtexturas de diferentes formas devem ser controladas de forma precisa e descritas quantitativamente. No entanto, informações relativas a avaliação quantitativa da geometria texturizada em diferentes metais ainda são escassas na literatura.

Porém, o processo de texturização a laser é um processo que apresenta vários parâmetros de entrada e múltiplas variáveis de resposta, o que faz com que o adequado controle do processo seja fundamental no sentido de se obter as superfícies consideradas otimizadas. A combinação das variáveis do processo para se obter determinado perfil topográfico nas superfícies texturizadas necessita do conhecimento da influência das principais variáveis do processo.

Os primeiros resultados relevantes obtidos com LST foram verificados de forma teórica e experimentalmente em selos mecânicos (ETSION, 1999). A tecnologia baseada na texturização de superfície tecnologia geralmente referenciada na literatura como *Laser Surface Texturing* (LST). Esta tecnologia consiste na adição de micro cavidades na topografia de superfícies, previamente definidos. A Figura 2.29, mostra duas configurações de texturas

aplicadas em anéis de pistão. A utilização de superfícies planas texturizadas pode gerar sustentação hidrodinâmica (BRIZMER et al, 2003; FOWELL et al., 2007).

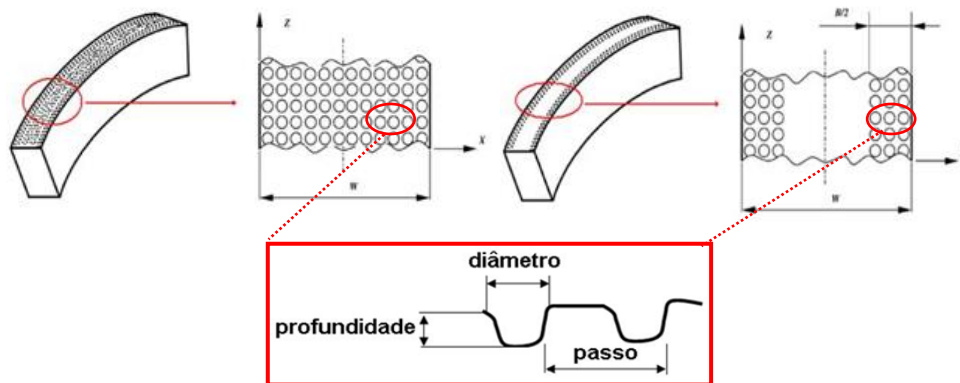


Figura 2.29 – Ilustração de duas configurações da região de texturização da face da ponta do anel. (a) Texturização Total e (b) Texturização Parcial
Fonte: Adaptado de Ryk et al. (2006)

2.4. Pesquisas anteriores relacionadas à texturização de superfície

2.4.1. Objetivos e critérios de busca

A pesquisa nas principais bases de dados envolvendo publicações científicas com o objetivo de analisar o tema da texturização em superfícies por laser e como vem sendo tratado na literatura é de fundamental importância para a sua contextualização. Neste sentido foram realizadas pesquisas por trabalhos na área caracterizadas por expressões como “*surface texturing*”, “*laser surface texturing*” e “*parameters laser*”. Além disso, foram adotados os seguintes critérios:

- Publicações recentes igual ou superior a 2009;
- Utilização de texturização em superfícies;
- Parâmetros laser utilizados.

Foram identificados cento e cinquenta sete artigos abordando texturização de superfícies. A análise dessas pesquisas foi feita através da classificação dos trabalhos quanto à data de publicação e classificação das pesquisas. Estas análises encontram-se discutidas nos itens seguintes em maiores detalhes.

2.4.2. Classificação dos trabalhos quanto à data de publicação

As Figuras 2.30 e 2.31, referentes as pesquisas anteriores, apresentam a classificação das pesquisas quanto ao período de publicação e a relevância para as Engenharias. Observa-se o gráfico que o número de publicações abordando a texturização de superfícies vem crescendo nos últimos anos e com destaque de 74% para as Engenharias. Esta constatação vai ao

encontro do que foi exposto anteriormente, indicando que o interesse da indústria por esta aplicação tem aumentado, e conseqüentemente o aumento do interesse industrial também aumenta a necessidade por investigações científicas que permitam elucidar e melhor compreender os fenômenos que envolvem o respectivo processo. Tais observações colocam a texturização como uma linha de pesquisa atual e de relevância científica.



Figura 2.30 – Quantidade de publicações desde 2009
 Fonte: Isi Web of Knowledge (2014)

Campo: Áreas de Pesquisa	Grave Conde	% De 31	Gráfico de Barras
ENGENHARIA	23	74,194%	
Ciência dos Materiais	8	25,806%	
MECÂNICA	4	12,903%	
FÍSICA	3	9,677%	
Engenharia Metalúrgica METALÚRGICA	2	6,452%	
CIÊNCIA, TECNOLOGIA OUTROS TEMAS	2	6,452%	
OPTICS	1	3,226%	

Figura 2.31 – Campo de áreas de pesquisa relacionadas à texturização de superfícies
 Fonte: Isi Web of Knowledge (2014)

2.4.3. Classificação da pesquisa dentro do universo científico

A análise das pesquisas dentro do universo científico, pode ser classificada quanto a sua natureza, objetivos, forma de abordar o problema e métodos utilizados, conforme mostra a Figura 2.32.

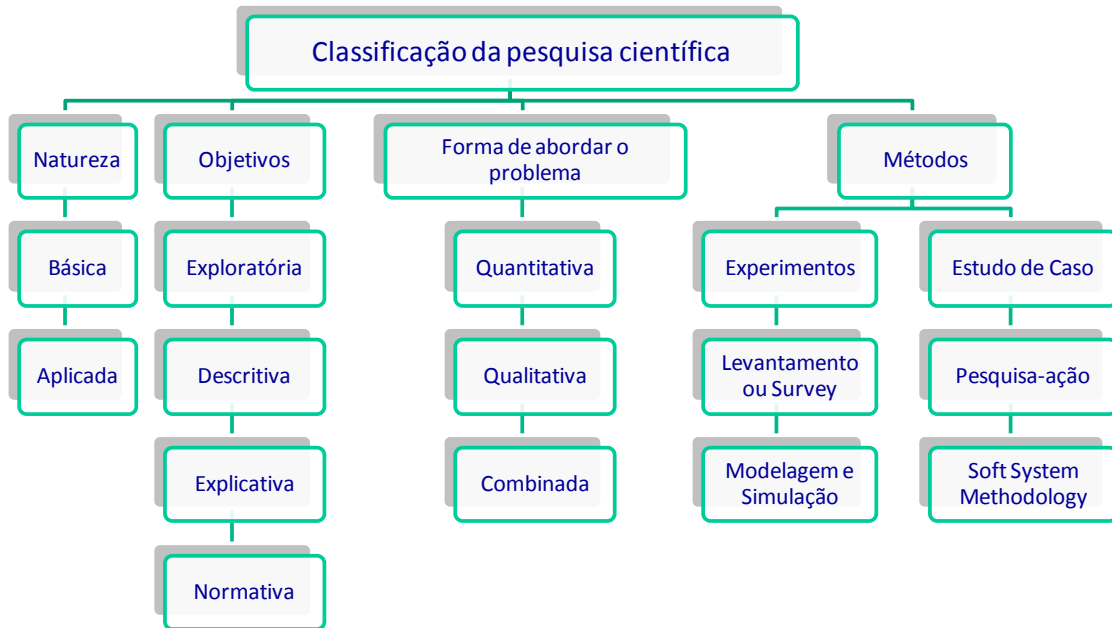


Figura 2.32 - Classificação da pesquisa científica
Fonte: Turrioni e Mello (2012)

A pesquisa segundo Turrioni e Mello (2012) pode ser classificada da seguinte maneira:

- **Quanto a natureza:** Aplicada, pois caracteriza-se por seu interesse prático, onde os resultados aplicados são para a solução de problemas dentro do cenário industrial;
- **Quanto ao objetivo:** Explicativa, pois visa identificar os fatores determinísticos que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Explica a razão, o “por quê” dos fenômenos. Quando realizada nas ciências naturais, requer o uso do método experimental para atingimento dos objetivos.
- **Forma de abordar o problema:** Quantitativa, pois considera a quantificação o traduzindo números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las utilizando de recursos e técnicas estatísticas como percentagem, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, etc.
- **Quanto aos métodos:** Experimento, pois determina um objeto de estudo, definem-se as formas de controle e a observação dos efeitos que a variável produz no objeto de estudo selecionando as variáveis que seriam capazes de influenciá-los.

Com base na classificação das pesquisas, pode-se reafirmar que a principal característica da pesquisa experimental é que o pesquisador tenha controle total sobre os valores que as variáveis independentes irão assumir, ou seja, é o pesquisador quem estabelece e controla os valores que serão experimentados. Por se tratar de um método de pesquisa quantitativo, onde o objetivo do pesquisador é demonstrar, usando técnicas de análise

estatísticas, as relações causais entre a variável independente e a variável dependente, definem-se as formas de controle e a observação dos efeitos que a variável produz no objeto de estudo (TURRIONI & MELLO, 2012).

Desta forma, para auxiliar nos desafios de utilização e ajuste de processos multivariados (múltiplos parâmetros e respostas) como é o caso do laser aplicado em texturização de superfícies, há uma série de técnicas experimentais que podem ser utilizadas com o intuito de tornar tais tarefas mais rápidas e menos empíricas. Dentre outras vantagens, tais técnicas permitem maior agilidade e aplicabilidade nos meios industriais, através do conhecimento da influência das variáveis e otimização em relação ao que se pretende atingir. Muitas destas técnicas se baseiam em métodos estatísticos representados pelo projeto e análise de experimentos (DOE do inglês *Design of Experiments*). Dentro da engenharia de manufatura, diferentes métodos de otimização de processos tem sido utilizados de forma cada vez mais eficiente e econômica. Assim, métodos como a Metodologia de Superfície de Respostas (MSR) e o seu índice de otimização descrito como *Desirability*, o método Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) combinando as técnicas da Metodologia de Superfície de Resposta e da Análise de Componentes Principais para a otimização simultânea de múltiplas respostas correlacionadas, os algoritmos de busca como o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o Algoritmo Genético (AG) vêm sendo constantemente empregados (PAIVA, 2008). As utilizações destes métodos normalmente estão associadas a técnicas e estatísticas sofisticadas como o Projeto e Análise de Experimentos, o qual permite uma compreensão ampla a respeito de um fenômeno, contribuindo para a melhoria de eficiência dos processos e níveis de qualidade dos produtos.

2.5. Projeto e Análise de Experimentos

Define-se um experimento como um teste ou vários testes em série em que mudanças são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema com o objetivo de observar e identificar a forma como as respostas desse sistema são afetadas em função das mudanças provocadas nas variáveis de entrada. Assim, a experimentação, segundo Montgomery (2005), se caracteriza como uma parte fundamental na análise das diversas aplicações de engenharia para o método científico.

De acordo o mesmo autor, o Projeto e Análise de Experimentos (*Design of Experiments* – *DOE*), é então definido como o processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, resultando em

conclusões válidas e objetivas. Dessa forma, qualquer problema experimental deve ser sustentado por dois elementos: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos dados.

Se mostrando como um conjunto de ferramentas importantes para o desenvolvimento de produtos e processos, as técnicas do Projeto e Análise de Experimentos têm encontrado uma ampla aplicação em diversas áreas de conhecimento. Os principais benefícios alcançados com o emprego das técnicas do DOE estão resumidos no quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Benefícios com o emprego do DOE para o Projeto de Análise de Experimentos

Melhoria do rendimento dos processos;
Redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais;
Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
Redução de custos.

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003)

Segundo Montgomery (2005), três princípios básicos do Projeto de Experimentos, são a aleatorização, a replicação e a blocagem. A aleatorização consiste na execução dos experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação. A replicação é a repetição de um mesmo teste várias vezes, criando uma variação para a variável de resposta utilizada para avaliação do erro experimental. A blocagem deve ser utilizada quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais. Permite-se com esta técnica avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados alcançados.

A abordagem estatística no Projeto e Análise de Experimentos necessita que as pessoas envolvidas nos experimentos tenham uma ideia clara a respeito do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e de um entendimento básico das ferramentas de análise utilizadas. As etapas propostas segundo Montgomery (2005) para o emprego do Projeto e Análise de Experimentos são as seguintes:

1. Definição do problema;
2. Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho;
3. Seleção das variáveis de resposta;
4. Escolha do projeto experimental;
5. Execução dos experimentos;
6. Análise estatística dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

As técnicas mais utilizadas com relação aos projetos experimentais, compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta. Dessa forma, o quadro 2.4, reúne as principais características relacionadas a cada uma dessas técnicas experimentais.

Quadro 2.4 - Características as principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis	Processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma pré análise do processo com um número reduzido de corridas	Não promove a varredura completa da região experimental	Processos onde se deseja um pré conhecimento e onde a literatura é limitada Corridas que demandam maior tempo ou custo
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos	Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003)

O presente trabalho para atingir os seus objetivos utilizou o projeto fatorial completo posteriormente complementado pela Metodologia de Superfície de Resposta, visando a avaliação dos parâmetros no perfil topográfico texturizado e a posterior otimização dos parâmetros do laser para texturização de superfícies em aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN). Sendo assim, os principais conceitos que fundamentam a Metodologia de Superfície de Resposta são discutidos com maiores detalhes no item que se segue.

2.6. Metodologia de Superfície de Resposta

Segundo Montgomery (2005), a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), é uma coleção de ferramentas matemáticas e estatísticas utilizada para a modelagem e análise de

problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e a otimização desta resposta é o objetivo principal.

Verifica-se que as relações entre a resposta e as variáveis independentes são desconhecidas para a maioria dos problemas. Assim, o primeiro passo consiste em encontrar uma aproximação adequada para representar a resposta de interesse em função das variáveis do processo. Geralmente, funções polinomiais são empregadas para a descrição de tais relações e se a resposta for bem modelada por uma função linear, a relação pode ser representada pelo seguinte modelo de primeira ordem [equação 2.2]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.2)$$

Onde:

- y – Resposta de interesse;
- x_i – Variáveis independentes;
- β_i – Coeficientes a serem estimados;
- k – Número de variáveis independentes;
- ε – Erro experimental.

Um polinômio de maior grau deve ser usado e se o sistema apresentar curvatura o modelo de segunda ordem será descrito pela [equação 2.3]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.3)$$

Um ou ambos os modelos acima são utilizados em quase todos os problemas de superfície de resposta. Além disso, é improvável que o modelo polinomial se comporte como uma aproximação adequada para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes. Entretanto, tais modelos têm se mostrado eficientes para uma região específica.

O algoritmo tipicamente usado para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das [equações 2.2 e 2.3], é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares* – OLS). Com isso, fica construída a função aproximada que relaciona a resposta de interesse com as variáveis do processo. Após a construção do modelo, a significância do mesmo é verificada através de um procedimento ANOVA (Análise de Variância). Este teste de significância é importante para avaliar se o modelo é estatisticamente significativo. Além disso, o ANOVA também permite verificar quais entre os termos do

modelo são significativos e quais podem ser removidos. O ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o R^2 ajustado (R^2 (adj.)), que considera o fato de que R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Segundo Paiva (2006), uma visão mais detalhada envolvendo o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, Análise de Variância e ajuste dos modelos pode ser observada juntamente com outras análises importantes como a análise de resíduos e o teste de falta de ajuste (*Lack-of-fit*).

Na Metodologia de Superfícies de Resposta o arranjo experimental mais utilizado para a coleta de dados é o arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*). O arranjo de *Box-Behnken*, porém, pouco aplicado em comparação ao emprego do CCD é outro arranjo que também pode ser utilizado.

O arranjo composto central é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou fracionado, um conjunto de pontos centrais e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados pontos axiais Figura 2.33. O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. O CCD pode ser circunscrito, inscrito ou de face centrada, em função da localização dos pontos axiais.

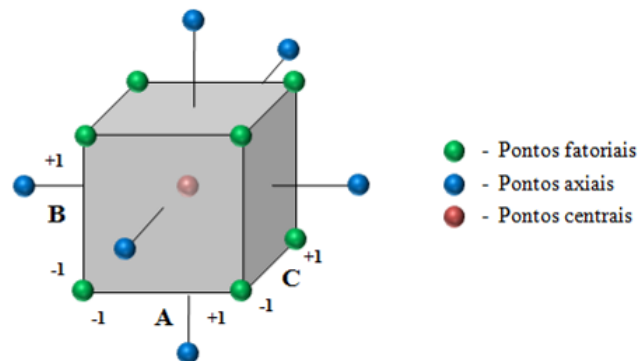


Figura 2.33 – Arranjo composto central para três fatores
Fonte: Paiva (2006)

No arranjo composto circunscrito (CCC) que corresponde ao CCD original, os pontos axiais estão a uma distância α dos pontos centrais, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator. O arranjo inscrito (CCI) é adequado para situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis. O arranjo de face centrada (CCF) caracteriza-se por $\alpha =$

+1 ou -1, ou seja, por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial e requer três níveis para cada fator.

O valor de α depende do número de experimentos da porção fatorial do CCD. Assim, segundo Box e Drapper (1987), $\alpha = (2^k)^{1/4}$, sendo k o número de fatores analisados. Um CCC explora o maior espaço experimental possível, enquanto um CCI explora o menor.

A Metodologia de Superfície de Resposta é uma das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos e tem sido utilizada com frequência por vários pesquisadores, contribuindo para a otimização e para um melhor entendimento acerca dos fenômenos que caracterizam os mais diversos processos de fabricação. Assim, segundo Nilo Júnior (2003), Correia et al. (2005), Palani & Murugan (2007), Rodrigues et al. (2008), Balasubramanian et al. (2009a), Balasubramanian et al. (2009) e Lakshminarayanan & Balasubramanian (2009), casos de sucesso no emprego desta metodologia podem ser observados em vários setores de aplicações industriais.

2.7. Otimização multi-objetivo

A otimização multi-objetivo, é uma metodologia é a otimização de um conjunto de funções de maneira sistemática. Estudos vêm sendo empregados para aplicações de engenharia de manufatura, na medida em que os objetivos são de natureza de geração de conflito. Segundo Baril *et al.* (2011), o problema de otimização multi-objetivo determina o vetor de variáveis de decisão $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ que otimiza o vetor de funções objetivo $F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\}$, dentro de uma região de solução viável. A formulação pode ser descrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min } F(X) &= \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)\} \\ \text{s. a. : } h_i(X) &= 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \\ g_j(X) &= 0 \quad j = 1, 2, \dots, q \\ X^{\min} &\leq X \leq X^{\max} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Onde: $h_i(X) = 0$ – Restrições de igualdade

$g_i(X) = 0$ – Restrições de desigualdade

X^{\min}, X^{\max} – Limites mínimo e máximo para as variáveis de decisão

Há um consenso na literatura de que nos problemas multi-objetivo é muito pouco provável que exista uma solução ótima X^* que minimize todas as funções de maneira

simultânea. No geral, os m objetivos apresentam conflitos de interesse. Portanto, o conceito de solução Pareto-ótima, segundo Rao (2009), passa a ser de grande relevância para esses tipos de problema. De acordo com o autor, uma solução viável x^* é denominada Pareto-ótima se não existe outra solução viável y tal que $f_i(y) \leq f_i(x^*)$, $i = 1, 2, \dots, m$, com $F_j(y) < f_j(x^*)$ em pelo menos um objetivo j . Um vetor X^* é dito Pareto-ótimo se não existe outra solução Y que irá provocar a redução em alguma função objetivo sem causar um aumento simultâneo em pelo menos um dos outros objetivos.

A tarefa essencial dos métodos de otimização multi-objetivo é de identificar não somente um ponto de ótimo, mas um conjunto de soluções Pareto-ótimas que delimitam a fronteira de eficiência do problema, mais conhecida como fronteira de Pareto (KONAK *et al.*, 2006). A partir da construção da fronteira, critérios adicionais podem ser utilizados para selecionar a solução considerada mais viável (BARIL *et al.*, 2011; LI *et al.*, 1999; RAO, 2009). No entanto, Sanchis *et al.* (2010) consideraram essa tarefa como subjetiva, já que depende da experiência e da preferência na tomada de decisão e análise das informações da fronteira analisada. A Figura 2.34, ilustra uma fronteira de Pareto construída para um problema biobjetivo. Nesta Figura, os pontos A_1 e A_2 correspondem aos pontos de ancoragem da fronteira, ou seja, para cada função objetivo a otimização é representada pelos pontos individuais.

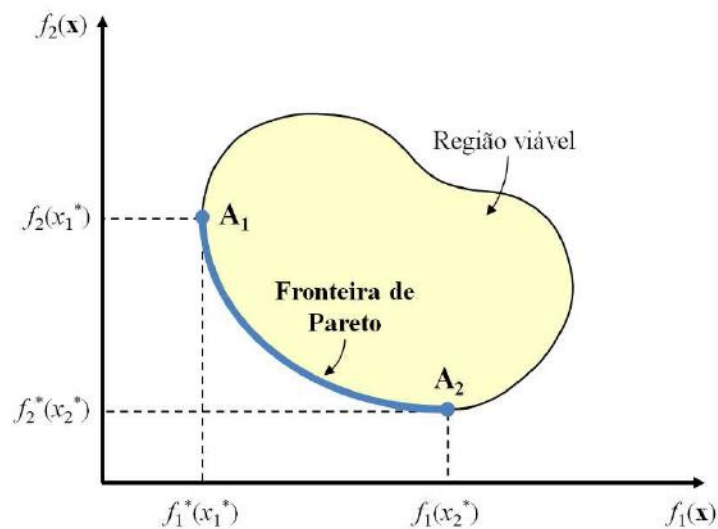


Figura 2.34 - Fronteira de Pareto para um problema biobjetivo
Fonte: Adaptado de Vanidinasab e Jadid (2010)

Na literatura, vários métodos para a otimização de múltiplos objetivos podem ser encontrados. De um modo geral, estas estratégias podem ser divididas em dois grupos distintos: os métodos de aglutinação e os métodos da priorização das funções objetivo. Para os métodos de aglutinação, consiste em combinar as funções objetivo individuais em uma única

função, que se torna o objetivo global do problema. A otimização da função global garante a otimização das funções objetivo individuais. Nos métodos de priorização, elege-se a função objetivo mais importante para ser otimizada e as demais são tratadas no problema como restrições. Exemplos dessa abordagem incluem o método de restrição ϵ (LI *et al.*, 1999), e a programação lexicográfica conforme (RAO, 2009).

Outra classificação dos métodos multi-objetivo foi apresentada por Miettinen (1999). Segundo o autor, as seguintes categorias para os vários métodos existentes podem ser organizados da seguinte maneira:

Métodos sem preferência: são estratégias simples no qual após a solução encontrada, o problema multi-objetivo é resolvido e apresentada ao tomador de decisão, que pode aceitá-la ou não. Estes métodos são indicados para as situações em que o tomador de decisão não possui maiores expectativas a respeito do ponto de ótimo, ficando, portanto, satisfeito com qualquer solução obtida, dentro desta categoria encontra-se classificado o critério global.

Métodos a posteriori: o conjunto de soluções Pareto-ótimas, após gerado, é apresentado ao tomador de decisão para que se determine a solução mais viável. Entretanto, a análise de todo o conjunto pode se tornar uma tarefa difícil. Assim, é conveniente reduzir o tamanho do conjunto de soluções para auxiliar na tomada de decisão na seleção final. Os métodos a posteriori consideram, entre outras alternativas, o método de somas ponderadas, o método de métricas ponderadas e o método de restrição ϵ .

- **Métodos a priori:** Neste método tentam quantificar a preferência do tomador de decisão e, utilizando-se desta informação, determinam o melhor ponto de ótimo. Exemplos desta categoria incluem a programação lexicográfica, a programação linear física e por metas (BARIL *et al.*, 2011).

Métodos interativos: O tomador de decisão participa ativamente do processo de solução iterativo, especificando suas preferências de maneira gradual. Como exemplos, temos o método de Tchebycheff e os algoritmos interativos para problemas multi-objetivo Baril *et al.* (2011).

Dentre as opções apresentadas, a escolha do presente trabalho recai sobre o método de restrição ϵ , uma vez que o objetivo proposto é o desenvolvimento de um método para a identificar o conjunto de soluções Pareto-ótimas, apresentando ao tomador de decisão para que se determine a solução mais viável de ponderações ótimas. Além disso, conforme já mencionado, as técnicas de programação matemática aqui utilizadas, ou seja, o Método ϵ , apresentam, em sua essência, o princípio de ser um método mais simples e segue o modelo de “Priorização”. Neste caso, a função mais importante é escolhida como função objetivo,

enquanto que as demais funções são tratadas como restrições com valores compreendidos entre limites previamente estabelecidos. A formulação neste caso pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \text{Min } & f_1(x) \\ \text{s. a.: } & g_i(X) \leq 0 \\ & L_i \leq f_1(x) \leq U \end{aligned} \tag{2.5}$$

Onde: $L_i = \text{Lower_bound}$

$U_i = \text{Upper_bound}$

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo descrever o método experimental utilizado a partir dos conceitos apresentados no capítulo 2. Para que o processo estudado seja tratado de modo sistemático, o método a ser definido para a pesquisa é muito importante para o processo estudado, obtendo informações objetivas e contribuindo para a relevância científica. Sendo assim, inicia-se com uma reafirmação do problema de pesquisa, para em seguida definir o método experimental e finalmente descrever os equipamentos utilizados.

3.2. Problema de pesquisa

Conforme apresentado no Capítulo 1, no presente trabalho, devido a sua natureza de múltiplas variáveis no *set-up* do equipamento, busca-se a identificação da combinação ótima dos parâmetros laser que permitam texturizar geometrias previamente definidas com características topográficas específicas como largura, comprimento e profundidade, garantindo em seu ajuste final os níveis adequados de qualidade e produtividade. A Figura 3.1, ilustra as geometrias propostas para este trabalho e seus alvos a serem atingidos sendo que das três geometrias de texturas propostas será aplicado no *design* (b).

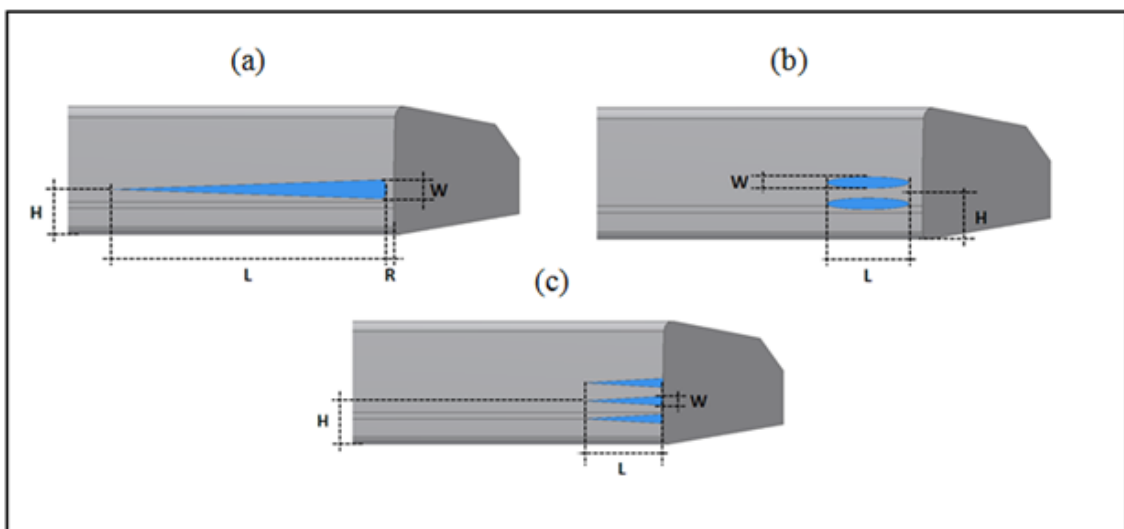


Figura 3.1- Texturização a laser: (a) Canais (b) Reservatórios (c) ranhuras
Fonte: Mahle (2013)

O regime de lubrificação do *Top ring* é caracterizado como misto (hidrodinâmico no curso e metal metal nos pontos de reversão). A inclusão dos reservatórios na ponta dos anéis (áreas que recebem a maior força proveniente dos gases de expansão) visa melhorar a

lubrificação nas pontas aumentando a sustentação hidrodinâmica na região. Vale comentar que estes alvos específicos se referem a uma textura que permita obter condições de lubrificação tal que culmine com a minimização do desgaste de anéis em aplicações automotivas. Entretanto, as análises de direcionamento, posicionamento e quantidade das texturas não serão foco neste trabalho. Deve-se considerar:

- Alvo para a largura [$W = 0,20\text{mm}$];
- Alvo para o comprimento [$L = 3,0\text{mm}$];
- Alvo para a profundidade da textura [$P = 0,01\text{mm}$];
- A aplicação do laser com ocorrência nula de defeitos;
- Isentos de falhas na superfície do anel;
- Para a distância (H) e (R), será utilizado o eixo CNC de deslocamento da máquina para se atingir os alvos propostos conforme ilustra a Figura 3.1.

Portanto em função do que se pretende analisar em termos de aplicações do processo, se percebe que a texturização a laser se caracteriza como um processo de natureza multivariada (múltiplas variáveis e múltiplas respostas conforme Figura 3.2). Desta forma uma abordagem científica para este tipo de problema se torna importante para que as ferramentas de análise sejam corretamente definidas, permitindo que os resultados alcançados sejam coerentes e significativos.

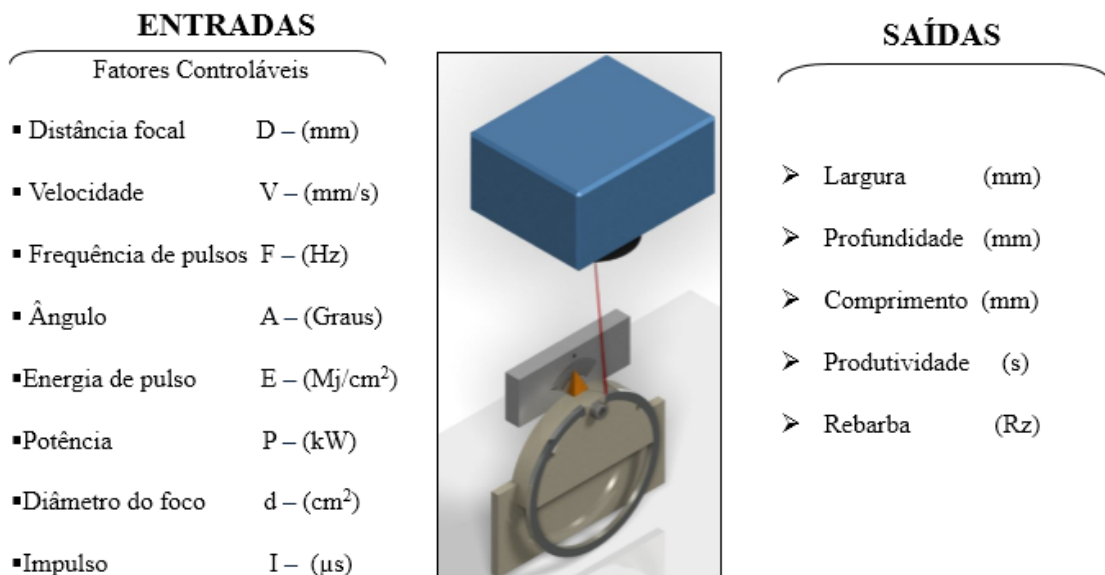


Figura 3.2 – Característica do objeto de estudo associado ao processo de texturização a laser

Conforme caracterizado pela Figura 3.2, o número excessivo de variáveis do processo e a conseqüente dificuldade de analisar a influência de todos estes parâmetros, exigiu a necessidade da realização de testes preliminares, procurando com isto identificar quais seriam

os mais significativos na caracterização da geometria (perfil topográfico) das ranhuras geradas. O quadro 3.1 mostra que os níveis de fixação dos parâmetros avaliados nesta etapa foram aleatórios, e os testes realizados bem como as geometrias observadas.

Quadro 3.1 – Níveis de fixação dos parâmetros utilizados na caracterização da geometria das texturas

Parâmetro	UN	Gráfico (Desfocagem, Velocidade, Frequência e ângulo)	Fotos
Distância focal	(mm)	<p>-3 550 60000 2</p>	
Velocidade	(mm/s)	<p>-2 625 72500 1</p>	
Frequência	(Hz)	<p>-1 550 85000 2</p>	
Ângulo	(Graus)	<p>-3 550 60000 0</p>	
Energia de pulso	(Mj/cm ²)	<p>-4 475 72500 1</p>	

Continuação Quadro 3.1 – Níveis de fixação dos parâmetros utilizados na caracterização da geometria das texturas

Parâmetro	UN	Gráfico (Desfocagem, Velocidade, Frequência e ângulo)	Fotos
Potência	(KW)	<p>-3 200 60000 0</p>	
Diâmetro do laser	(cm ²)	<p>-3 100 450000 0</p>	
Impulso	(s)	<p>0 400 10000 0</p> <p>Impulsos de 1 a 4000</p>	

Os resultados com as avaliações empíricas preliminares obtidos, conjuntamente com as observações realizadas, permitiram verificar que dentre os parâmetros do processo de texturização a laser utilizado, a desfocagem, a velocidade, a frequência foram os mais significativamente influentes na caracterização topográfica do revestimento de PVD. Entretanto, a influência deste fatores na caracterização geométrica do material texturizado não é totalmente conhecida, o que dificulta o ajuste do processo com o objetivo de obter uma determinada geometria. Neste sentido, este trabalho visa estudar exatamente a influência destes parâmetros selecionados na obtenção de uma determinada característica geométrica de

texturização, conforme mostra o quadro 3.1. Para isto, o procedimento experimental bem como os testes a serem realizados se baseará na utilização de ferramentas estatísticas do projeto e análise de experimentos, para em uma primeira fase trabalhar com a análise dos efeitos isolados e de interação dos parâmetros através de um fatorial completo e numa segunda fase proceder a uma tentativa de modelamento matemático das influências dos fatores nas respostas analisadas. Finalmente, a última etapa culminará com a otimização das respostas no sentido de obter a melhor geometria texturizada.

3.3. Metodologia de pesquisa

A experimentação foi utilizada como método de pesquisa para a otimização do objeto de estudo descrito anteriormente. Entre as técnicas de experimentação foi utilizado o Projeto e Análise de Experimentos, como definido anteriormente. Em processo de planejamento dos experimentos os dados são coletados e depois analisados por métodos estatísticos, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2005). Considerando os projetos experimentais do DOE, foi utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta, que se caracteriza como um conjunto de ferramentas indicado para a otimização de processos, além de permitir um amplo conhecimento a respeito do fenômeno estudado. Por fim, para a otimização propriamente dita, foram utilizados o método da priorização onde não se leva em consideração o alvo para as resposta. Com isso, o método experimental pode ser dividido em duas fases:

- **1ª Fase - Metodologia de Superfície de Resposta:** Utilizada para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados, modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros.
- **2ª Fase – Otimização pelo E-Méthod:** Utilizada para obter a combinação ótima dos parâmetros do laser que permitam modelar as funções de aproximação de pontos de ótimo, geralmente encontrados em regiões dotadas de curvatura, de acordo com sua convexidade.

As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram as etapas em cada fase do método experimental.

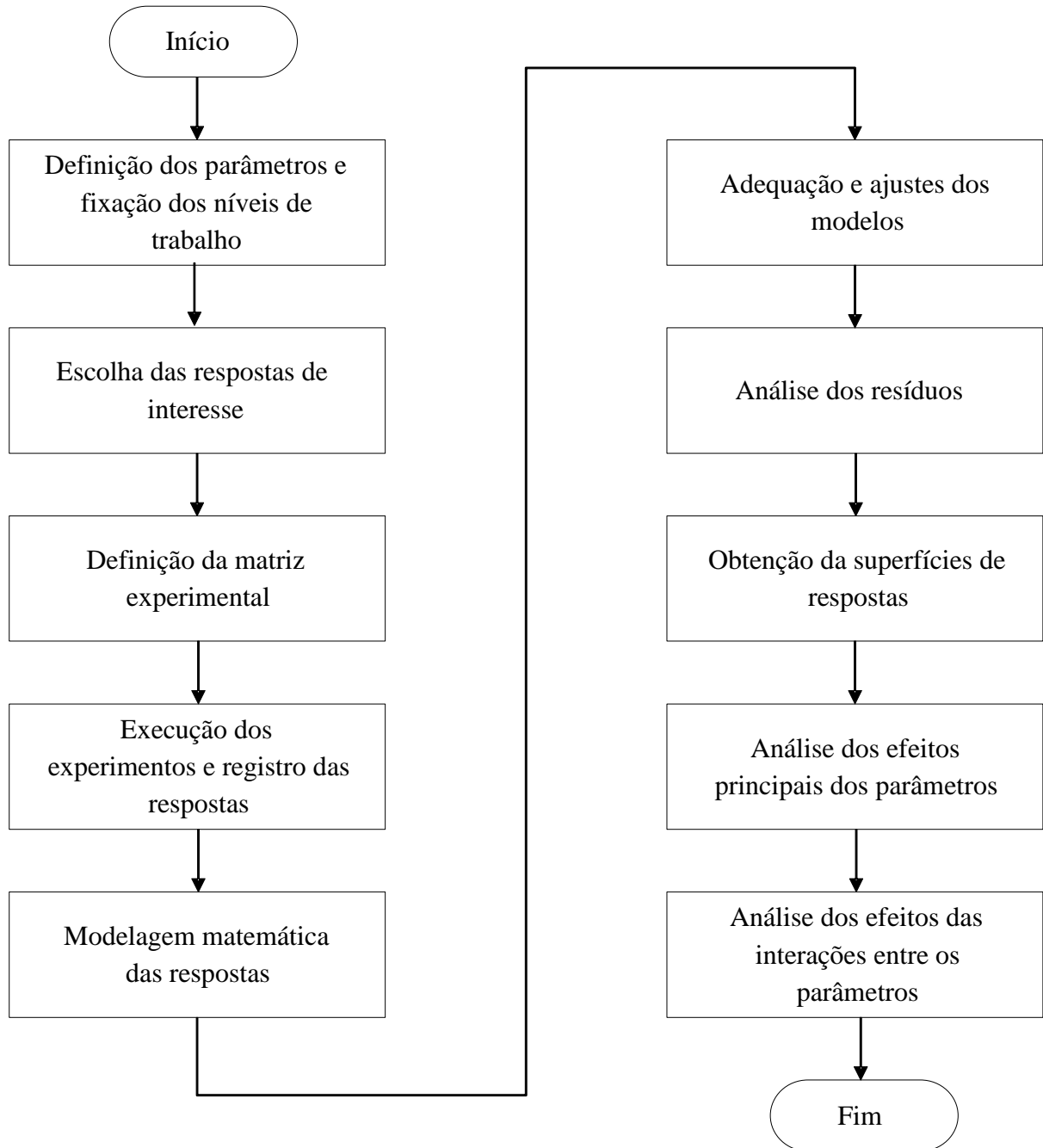


Figura 3.3 – Método experimental – Fase 1: Metodologia de Superfície de Resposta
Fonte: Adaptado de Paiva (2008)

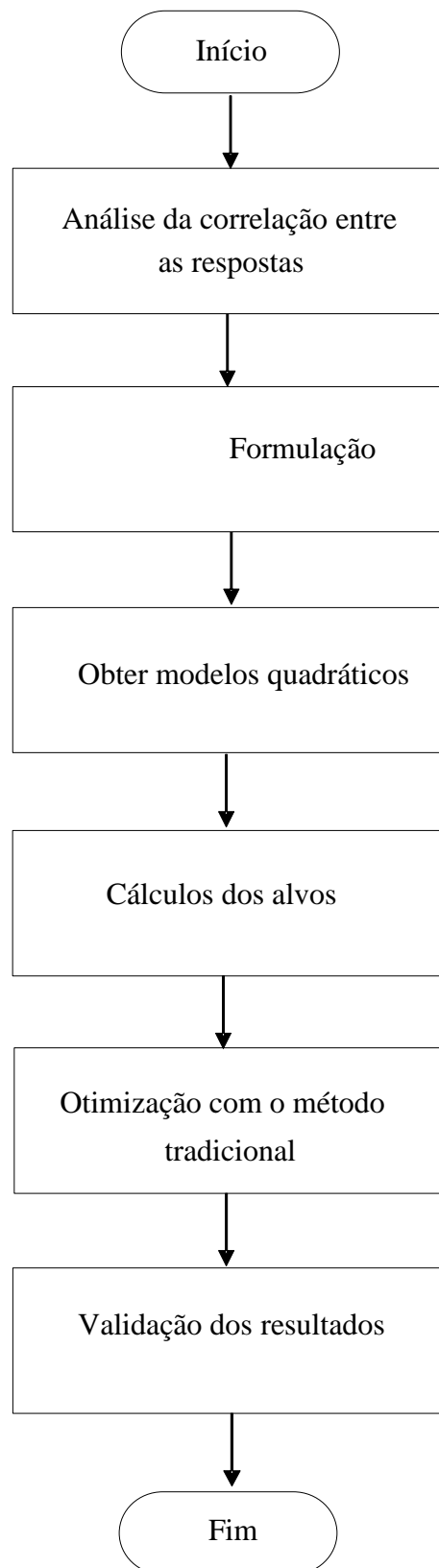


Figura 3.4 – Método experimental – Fase 2: Otimização pelo E-Méthod

3.4. Procedimento experimental

Para a execução do procedimento experimental segundo a metodologia estabelecida no item 3.3, foi utilizado um banco experimental constituído por um equipamento de gravação a laser que permite a remoção de material superficial gerando a texturização necessária para a lubrificação pelo acúmulo de óleo lubrificante. O equipamento utilizado foi um laser do tipo ND: YAG: 1064nm, o quadro 3.2 mostra as especificações para o laser utilizado, caracterizado por uma haste vertical que incide o foco de laser na peça a ser trabalhada. O processo LST utilizado é bastante flexível e permite o ajuste dos seguintes parâmetros: Desfocagem, Potência, Velocidade, Frequência dos pulsos, Energia de pulso, Pulso, Distância focal, Diâmetro do foco.

Quadro 3.2 – As especificações para o sistema do laser utilizado

Sistema laser VMc1	Valores
Comprimento de onda	1064nm
Tipo cristal	Nd:YAG
Qualidade do feixe	M2 < 1,8
Tamanho do campo de marcação	(f=163mm)
Frequência de repetição do pulso	Cw, 1-100 KHz
Ajuste máximo do ponto focal interno	60mm
Potência do laser	10W
Distância de trabalho	225,50 (mm)
Impulso	1

Fonte: Trumpf (2013)

Os experimentos foram executados em uma empresa do setor metal-mecânico localizada em Itajubá/MG, utilizando os equipamentos mostrados pela Figura 3.5.

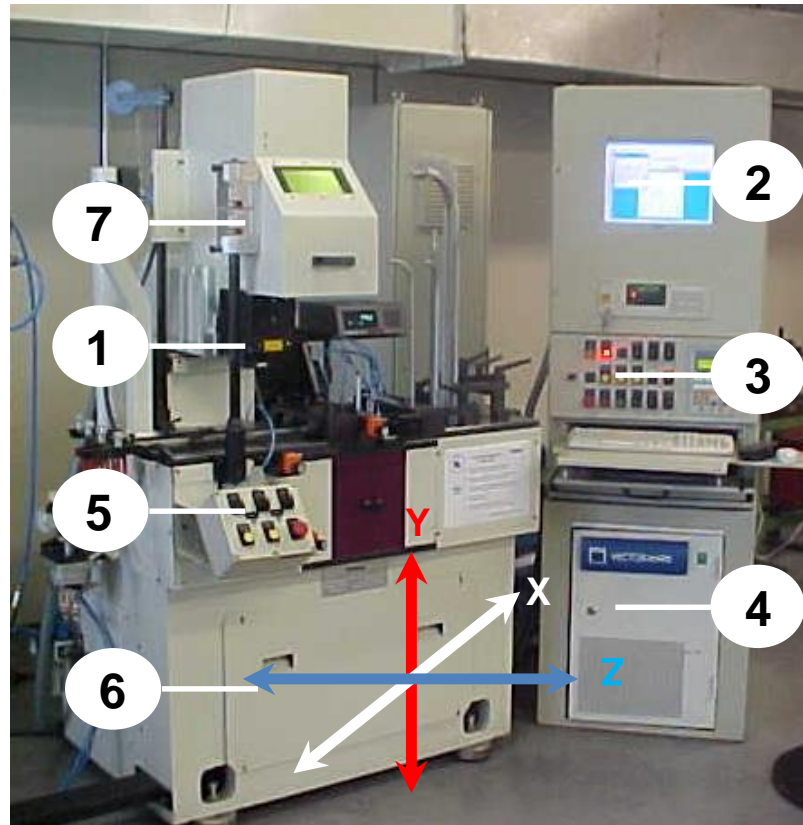


Figura 3.5 – Equipamentos utilizados
Fonte: Mahle (2013)

Onde:

1. Canhão laser;
2. Tela do computador;
3. Painel principal;
4. Sistema de controle do laser;
5. Painel secundário;
6. Sistema de movimentação dos eixos;
7. Cabine de proteção do laser.

A medição da geometria das ranhuras foi realizada com a finalidade de obter a resposta para o comprimento utilizando um microscópio óptico tridimensional (OGP) *Optical Gaging Products*, conforme ilustrado na Figura 3.6. Os corpos de prova foram posicionados no dispositivo para realização da medição.

Para medir a profundidade e largura das ranhuras na superfície do anel conforme ilustrado na Figura 3.7, foi utilizado um perfilômetro (MarSurf XC 20) *PC-based Stationary Contour Measuring Stations*. As imagens foram processadas e analisadas através do *software*.

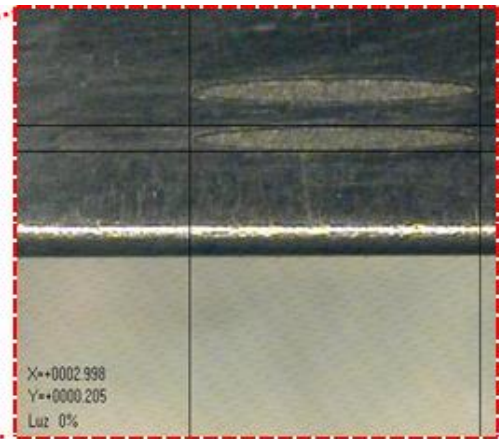
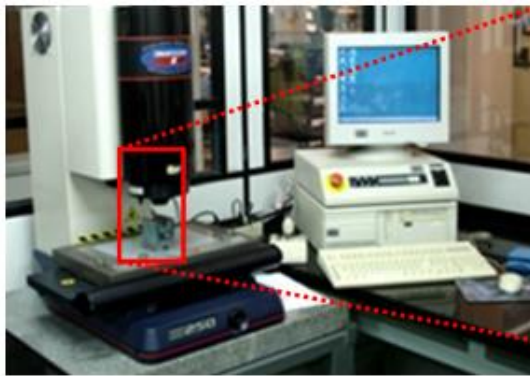


Figura 3.6 – Microscópio óptico tridimensional para medir o comprimento com ampliação de 50 X
Fonte: Mahle (2013)

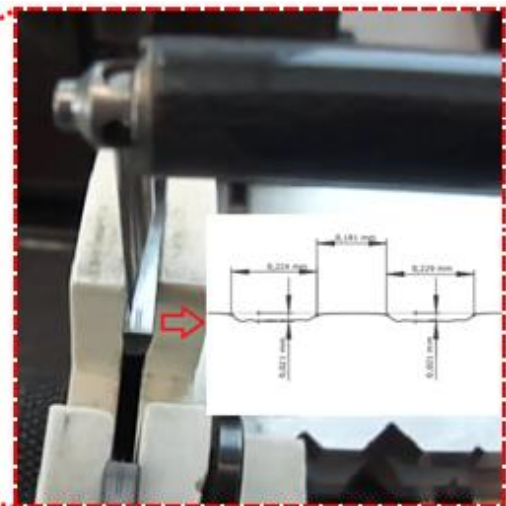
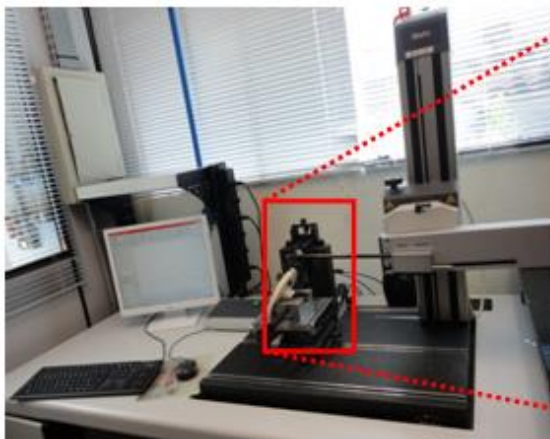


Figura 3.7 – Perfilômetro MarSurf XC 20 para medir a profundidade
Fonte: Mahle (2013)

3.5. Considerações finais

Neste capítulo para que os objetivos definidos fossem alcançados, foi apresentado o método experimental utilizado. O objeto de estudo foi considerado como um problema de otimização complexo (já que envolve múltiplos parâmetros de entrada e múltiplas variáveis de resposta), o método experimental ficou dividido em duas fases: a Metodologia de Superfície de Resposta e a otimização pelo E-Méthod para combinação linear das respostas e alvos utilizando o *software* Excel. As etapas seguidas para a condução de cada fase foram também definidas através dos fluxogramas apresentados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo descrever os resultados obtidos nas diferentes fases deste trabalho de pesquisa, bem como discutir os mesmos. Como o trabalho foi subdividido em 3 fases distintas, os resultados serão apresentados e discutidos na mesma ordem.

4.2. Análise Fatorial

Conforme descrito no item 3.2, após testes preliminares foram selecionados quatro parâmetros principais que se mostraram os mais significativos com relação as respostas a serem analisadas. Desta forma, esta fase experimental se pautou na avaliação dos efeitos principais destes parâmetros sobre as características geométricas, produtivas e qualidade da texturização sobre anéis de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) através da utilização da tecnologia a laser. A Figura 4.1 mostra de forma esquemática a caracterização do objeto de pesquisa aqui abordado.

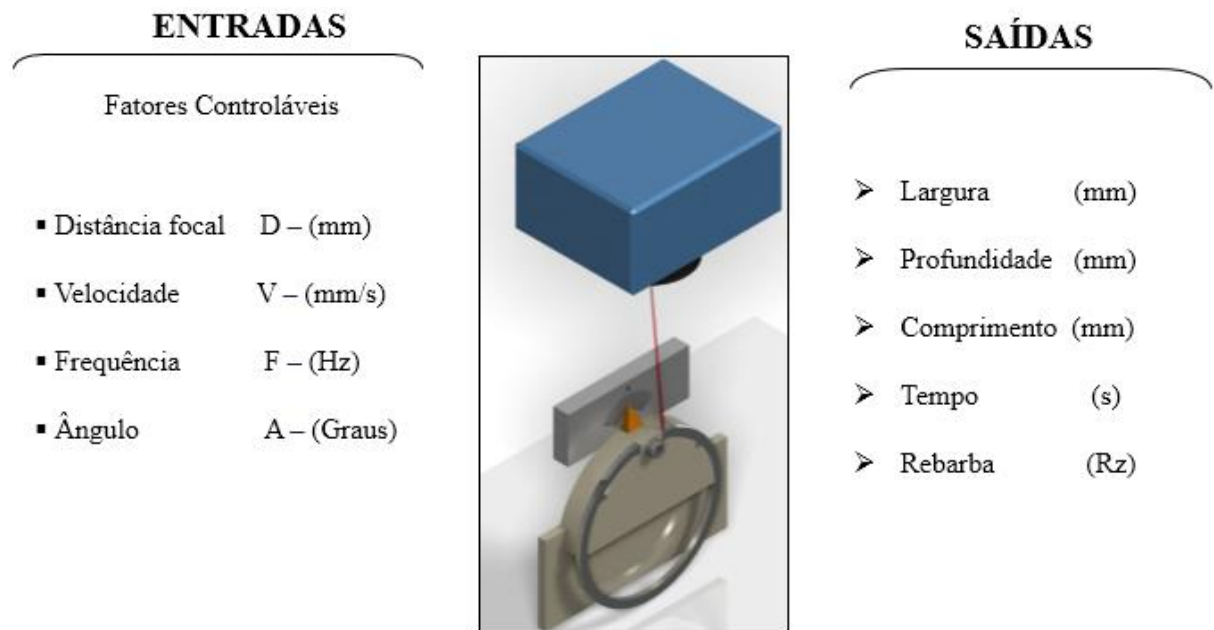


Figura 4.1 - Escopo do trabalho de pesquisa

No transcorrer dos testes preliminares foram selecionados níveis de trabalho e adotados limites para os parâmetros que se acreditavam fornecer melhor característica para a texturização da cobertura. Desta forma a Tabela 4.1 fornece informações a respeito dos parâmetros variáveis e seus respectivos níveis de trabalho para estudo. A Tabela 4.2 mostra as

condições de operação dos parâmetros onde foram estabelecidos os níveis mínimo (-1) e máximo (+1) adotados como níveis fixos no decorrer de todos os experimentos.

Tabela 4.1 – Parâmetros variáveis e níveis de trabalho

Parâmetros	Unidade	Notação	Níveis de trabalho				
			-2	-1	0	+1	+2
Desfocagem	mm	D_p	-4	-3	-2	-1	0
Velocidade	mm/s	V_L	325	400	475	550	625
Frequência	Hz	F_e	47250	60000	72750	85500	98250
Ângulo	°	A°	-1	0	1	2	3

Tabela 4.2 – Parâmetros fixos, tipos e níveis de trabalho

Parâmetros	Unidade	Notação	Valores de trabalho
X5 Energia de pulso	$[Mj/cm^2]$	E_p	23
X6 Potência do laser	$[kW]$	Pl	10W
X7 Diâmetro do foco	$[cm^2]$	df	M2 = 1,8
X8 Impulso	$[\mu s]$	I	Amplitude = 1

Quanto às outras variáveis que também compõem a texturização, estas foram tratadas como parâmetros fixo, conforme indica a tabela 4.2. A tabela 4.3 apresenta a composição química dos materiais utilizados.

Tabela 4.3 - Composição química do material base

Material (%)	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
Aço inoxidável	0,80 - 0,95	0,25 - 0,40	0,040	0,040	0,35 - 0,50	12,4	17,0 - 18,0
MS066-N	V	Mo					
	0,08 - 0,15	1,00 - 1,25					

Em vista do objetivo do trabalho e do potencial de análise do conteúdo resultante, as respostas consideradas de maior relevância compreendem os seguintes itens:

- **Características geométricas:** Largura da impressão (W), Comprimento da impressão (L) e Profundidade da impressão (P).
- **Características produtivas:** Tempo de marcação (T).
- **Características de Qualidade:** Rebarba (R).

Como respostas dos experimentos foram definidas a profundidade das ranhuras (P) como Y1, largura da ranhura (W) como Y2, o comprimento da ranhura (L) como Y3, o tempo de marcação (T) como Y4 e a rugosidade (R) como Y5. Os dados foram calculados para cada combinação de parâmetros da matriz de experimentos para melhor entendimento a quadro 4.1 mostra cada resposta (Y) do experimento.

Quadro 4.1: Variáveis de respostas para os experimentos

Respostas (Y) para as ranhuras	
Y1 Profundidade	(P)
Y2 Largura	(W)
Y3 Comprimento	(L)
Y4 Tempo	(T)
Y5 Rebarba	(R)

4.3. 1ª Fase: Metodologia de Superfície de Resposta

Conforme apresentado na seção anterior, foram analisados os efeitos principais dos parâmetros sobre a geometria das ranhuras. Pelos resultados obtidos observa-se que a delimitação da superfície de contorno foi bem definida, visto que os resultados de correlação dos parâmetros foram bastante adequados para os limites (-1) e (+1).

Em vista destes resultados, partiu-se para a 2ª fase no sentido de desenvolver um modelamento matemático de 2ª ordem, bem como ao final desta fase realizar a otimização do processo aplicado aos anéis de aço inoxidável revestido com PVD. Desta forma, nesta fase completou os experimentos realizados na 1ª fase, utilizando agora a metodologia RSM aplicados aos mesmos 4 parâmetros, com o objetivo de determinar a sua influência nas mesmas respostas da 1ª fase. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros analisados juntamente com níveis de trabalho.

4.3.1. Definição da matriz experimental

A matriz experimental adotada foi o arranjo composto central (CCD), contendo quatro fatores em cinco níveis, oito pontos axiais, sete pontos centrais e 1 replicação, totalizando 31 experimentos. O valor adotado para α foi 2,0 que é chamado de erro tipo 1 sendo denotado pela letra (α).

4.3.2. Execução dos experimentos e registro das respostas

Os equipamentos utilizados para a execução dos experimentos constituíram de um dispositivo fixado no centro da mesa de uma gravadora laser com ajustes do eixo X, Y, Z da máquina para controle da posição de fixação conforme (item 3.4). Com isso, os experimentos foram realizados através de simples disparo do laser sobre o anel de aço inoxidável. Quanto aos parâmetros do processo, foram considerados os parâmetros fixos definidos pela tabela 4.2 e os parâmetros variáveis e níveis de trabalho foram combinados de acordo com a tabela 4.4.

O registro das respostas foi realizado na seguinte sequência: (1) avaliação das características de qualidade, (2) cálculo da resposta de produtividade e (3) medição da geometria de texturização.

4.3.2.1. Registro da resposta de qualidade

A característica de qualidade foi avaliada pelos pesquisadores envolvidos no experimento através da avaliação dos gráficos de medição das ranhuras e logo após foi realizado superacabamento da face de contato dos anéis para eliminar rebarbas na superfície de contato geradas pela aplicação com o laser.

Para a medição da rebarba foi utilizado o mesmo perfilômetro (MarSurf XC 20) *PC-based Stationary Contour Measuring Stations*, conforme descrito no item 3.4. As imagens foram processadas e analisadas através do *software*. A condição para avaliação foi isento de defeitos e com aspecto superficial liso. A Figura 4.2 ilustra a condição com rebarba superficial após o disparo do laser, na sequência a Figura 4.3, ilustra como foi eliminado a rebarba superficial utilizando um sistema de árvore de anéis onde as peças são montados em pacote e em seguida é realizado superacabamento da face de contato.

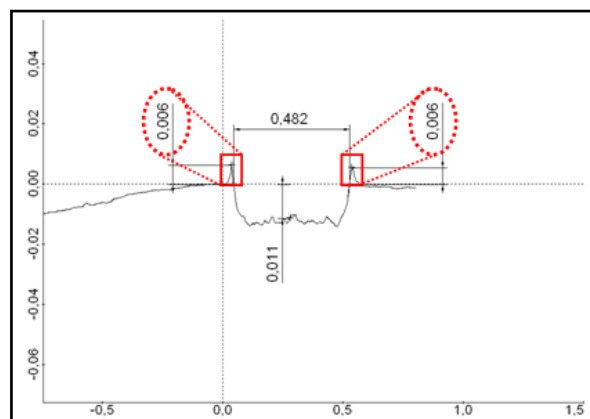


Figura 4.2: Rugosidades geradas pelo laser na superfície de contato dos anéis

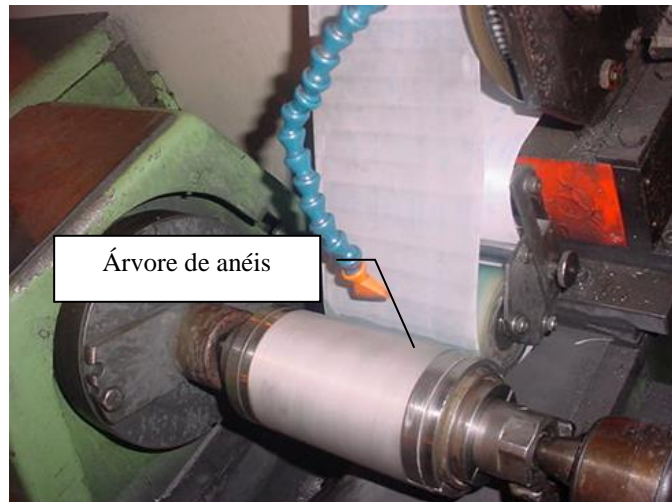


Figura 4.3: Superacabamento da face de contato dos anéis para eliminar rebarbas
 Fonte: Procedimentos internos da Mahle Metal Leve S.A (2014)

Além dos critérios adotados para avaliação da superfície (Isento de rebarbas), no resultado final após o teste de motor foram avaliadas as condições conforme segue:

- Não foram observados danos na parede do cilindro;
- Não foram observadas ocorrência de carbono tanto nos reservatórios;

Após a medição de todas as repostas de interesse, os dados obtidos foram reunidos para compor a matriz experimental, apresentada pela tabela 4.5. Nota-se que dados referentes a rebarba e tempo de aplicação foram considerados no estudo.

4.3.2.2. Registro da resposta de produtividade

Para a medição da resposta de produtividade após o disparo do laser sobre a peça de trabalho, os resultados referentes ao tempo de aplicação do laser está conforme ilustra a Figura 4.4, são registrados no *software* Trumark o tempo de ciclo e marcação dependendo dos parâmetros utilizados na programação.

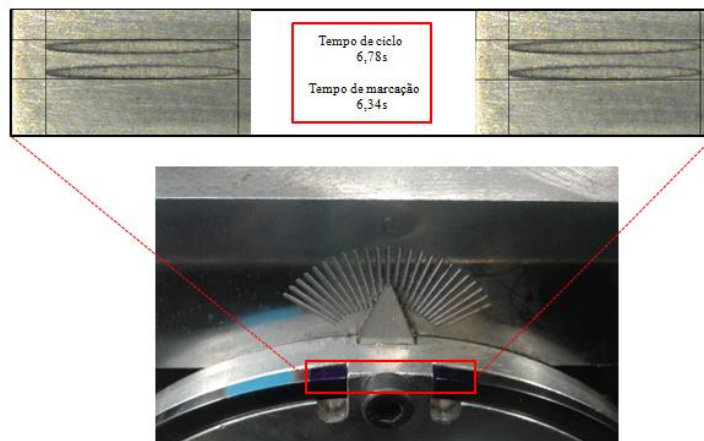
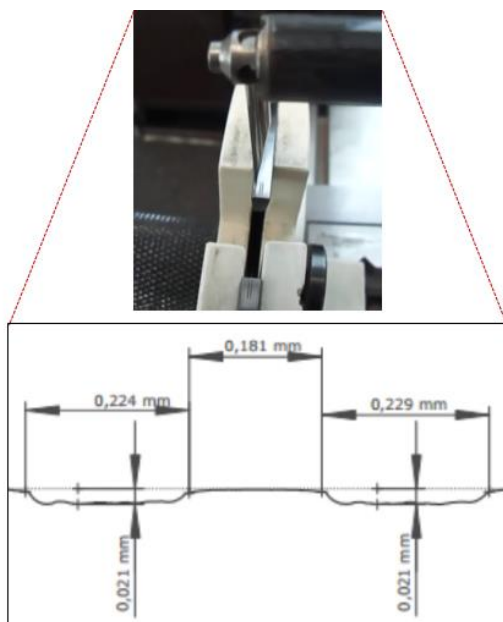


Figura 4.4 - Tempo de ciclo gerado na tela do *software* Trumark para gravação de duas ranhuras

4.3.2.3. Registro da geometria da ranhura

O procedimento utilizado para a medição da geometria dos reservatórios, profundidade e largura (a), foi realizado utilizando o *software* Perfilômetro MarSurf XC 20 como ilustrado na Figura 4.5. Devido ao modelo proposto possuir um formato elíptico, optou-se por realizar as medições no centro do design, objetivando a média das respostas em seu ponto máximo. Para a medição do comprimento do reservatório (b), utilizou-se o analisador microscópio óptico tridimensional OGP com ampliação de 50 X.

(a) Medição da profundidade e largura



(b) Medição do comprimento

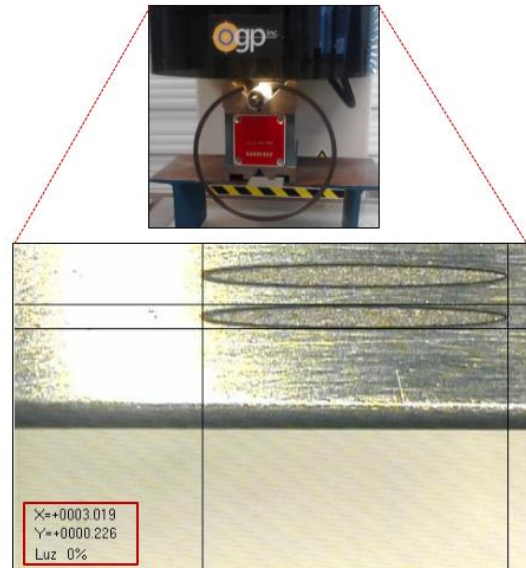


Figura 4.5 – Procedimento para medição da geometria do reservatório, profundidade, largura e comprimento

Fonte: Procedimentos internos da Mahle Metal Leve S.A (2014)

A título de ilustração, A Figura 4.6 apresenta dois perfis geométricos observados.

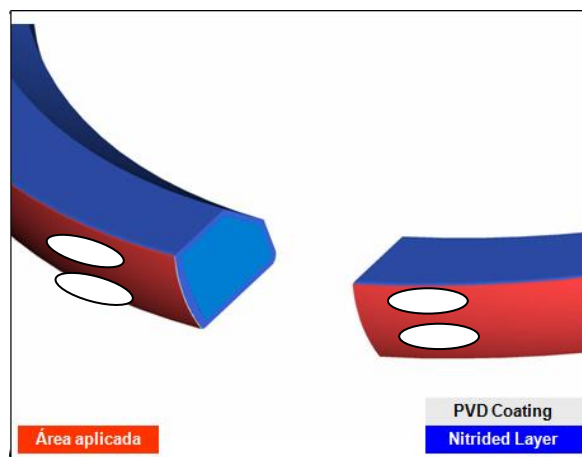


Figura 4.6 – Região do anel onde foram aplicadas as ranhuras

Após a medição de todas as repostas de interesse, estas foram reunidas para compor a matriz experimental, apresentada pela tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Matriz experimental

Parâmetros codificados				Matriz experimental									
X1	X2	X3	X4	Experimento	Parâmetros				Geometria			Produtividade	Qualidade
					D	V	F	A	P	W	L	T	R
D _p [mm]	V _L [m/min]	Fe [Hz]	A° [Graus]										
-1	-1	-1	-1	1	-3	400	60000	1	0,008	0,2048	2,976	6,90	0,003
1	-1	-1	-1	2	-1	400	60000	1	0,023	0,2048	2,999	7,09	0,010
-1	1	-1	-1	3	-3	550	60000	1	0,005	0,2048	3,029	6,03	0,005
1	1	-1	-1	4	-1	550	60000	1	0,021	0,2048	3,021	6,03	0,008
-1	-1	1	-1	5	-3	400	85000	1	0,005	0,2048	3,066	7,03	0,005
1	-1	1	-1	6	-1	400	85000	1	0,019	0,2048	3,039	7,05	0,010
-1	1	1	-1	7	-3	550	85000	1	0,000	0,2048	3,022	5,96	0,004
1	1	1	-1	8	-1	550	85000	1	0,016	0,2048	2,996	5,98	0,007
-1	-1	-1	1	9	-3	400	60000	2	0,023	0,2048	2,994	6,96	0,005
1	-1	-1	1	10	-1	400	60000	2	0,024	0,2048	2,969	7,02	0,010
-1	1	-1	1	11	-3	550	60000	2	0,008	0,2048	2,978	6,03	0,005
1	1	-1	1	12	-1	550	60000	2	0,021	0,2048	2,975	6,01	0,010
-1	-1	1	1	13	-3	400	85000	2	0,014	0,1976	3,022	7,11	0,004
1	-1	1	1	14	-1	400	85000	2	0,018	0,2048	3,054	6,98	0,009
-1	1	1	1	15	-3	550	85000	2	0,009	0,1976	2,993	5,99	0,007
1	1	1	1	16	-1	550	85000	2	0,015	0,2048	2,96	6,02	0,006
-2	0	0	0	17	-4	475	72500	2	0,003	0,1976	3,007	6,37	0,001
2	0	0	0	18	0	475	72500	2	0,022	0,2048	3,008	6,48	0,007
0	-2	0	0	19	-2	325	72500	2	0,022	0,2048	3,002	7,86	0,007
0	2	0	0	20	-2	625	72500	2	0,011	0,2048	3,018	5,74	0,004
0	0	-2	0	21	-2	475	47500	2	0,022	0,2048	2,995	6,42	0,006
0	0	2	0	22	-2	475	97500	2	0,009	0,2048	3,019	6,47	0,006
0	0	0	-2	23	-2	475	72500	1	0,008	0,2048	3,016	6,48	0,005
0	0	0	2	24	-2	475	72500	3	0,021	0,1976	3,009	6,45	0,007
0	0	0	0	25	-2	475	72500	2	0,020	0,2048	2,996	6,52	0,006
0	0	0	0	26	-2	475	72500	2	0,018	0,2048	3,005	6,49	0,005
0	0	0	0	27	-2	475	72500	2	0,018	0,2048	3,005	6,44	0,005
0	0	0	0	28	-2	475	72500	2	0,019	0,2048	3,014	6,53	0,005
0	0	0	0	29	-2	475	72500	2	0,020	0,2048	2,997	6,48	0,005
0	0	0	0	30	-2	475	72500	2	0,017	0,2048	2,986	6,43	0,005
0	0	0	0	31	-2	475	72500	2	0,020	0,2048	2,998	6,44	0,005

4.3.3. Modelagem matemática das respostas

Sendo assim é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo a partir dos dados experimentais apresentados pela tabela 4.6. Assim, a seção 2.7 apresentou a equação 2.3 como o modelo de superfície de resposta de segunda ordem utilizado para representar a relação aproximada entre uma dada resposta de interesse e as variáveis de entrada. Dessa forma, considerando o processo abordado pelo presente trabalho, em que são estudados os efeitos de quatro parâmetros, podemos escrever a equação 2.3 conforme indica a equação 4.1 a seguir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 Dp + \beta_2 VL + \beta_3 Fe + \beta_4 A^\circ + \beta_{11} Dp^2 + \beta_{22} VL^2 + \beta_{33} Fe^2 + \beta_{44} A^{\circ 2} + \beta_{12} DpVL + \beta_{13} DpFes + \beta_{14} DpaA^\circ + \beta_{23} VLFe + \beta_{24} TA^\circ + \beta_{34} FeA^\circ \quad (4.1)$$

Onde:

y – Resposta de interesse;

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4$ e $i < j$);

Dp – Desfocagem em relação a peça;

V_L – Velocidade do laser;

Fe – Frequência de pulso;

A° – Ângulo em relação a peça.

A estimação dos coeficientes foi feita através do *software* estatístico MINITAB®, que utiliza, para esta finalidade, o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). A tabela 4.5 apresenta os coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para as respostas consideradas neste trabalho.

Tabela 4.5 – Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos

COEFICIENTE	RESPOSTAS				
	P	W	L	T	R
<i>Constante</i>	0,01885	0,20480	3,00014	6,47571	0,00500
β_1	0,00512	0,00120	-0,0027	0,01625	0,00183
β_2	-0,00254	0,00000	-0,0047	-0,51375	-0,00039
β_3	-0,00262	-0,00060	0,01079	0,00625	-0,00019
β_4	0,00254	-0,00120	-0,0090	-0,00042	0,00030
β_{11}	-0,00166	-0,00075	0,00127	-0,01632	-0,00000
β_{22}	-0,00066	0,00015	0,00189	0,07743	0,00035
β_{33}	-0,00091	0,00015	0,00114	-0,01132	0,00049
β_{44}	-0,00116	-0,00075	0,00252	-0,00632	0,00040
β_{12}	0,00106	0,00000	-0,0045	-0,00687	-0,00061
β_{13}	-0,00031	0,00090	-0,0025	-0,01812	-0,00030
β_{14}	-0,00231	0,00090	0,00056	-0,01813	-0,00027
β_{23}	0,00043	0,00000	-0,0171	-0,02188	-0,00019
β_{24}	-0,00081	0,00000	-0,0075	0,00312	0,00021
β_{34}	-0,00018	-0,00090	0,00094	0,00688	-0,00016

Coeficientes em **negrito** indicam os termos significativos

4.3.4. Adequação e ajuste dos modelos

Através da Análise de Variância (ANOVA) a adequação dos modelos foi verificada e também pelo software *MINITAB*®. A Tabela 4.6 apresenta os resultados desta análise e mostra que para a profundidade, tempo e rebarba, todos os modelos desenvolvidos são adequados, pois apresentam *p-values* inferiores a 5% de significância. Os resultados do ANOVA também indicam que, com exceção da largura e comprimento, todos os modelos desenvolvidos apresentaram bons ajustes, já que os valores de $R^2(adj.)$ foram superiores a 70%. Para o comprimento, o ajuste obtido foi de 50,42% e para a largura o ajuste obtido foi de 68,61%.

Tabela 4.6 – Análise de Variância, ajuste e adequação dos modelos

Resposta	Graus de liberdade		Adj. SS		Adj. MS		F	P	Lack-of-fit	R ² (adj.) (%)
	Regressão	Residual	Regressão	Residual	Regressão	Residual				
P	14	16	14	0,000054	0,001348	0,000096	3,07	0,092	0,001	92,76%
W	14	16	14	0,000030	0,000011	0,000002	-	-	0,001	68,61%
L	14	16	14	0,003790	0,000847	0,000266	4,83	0,034	0,012	50,42%
T	14	16	14	0,03466	0,46875	0,00217	1,53	0,312	0,036	99,01%
R	14	16	14	0,000018	0,000008	0,000001	6,39	0,017	0,001	73,69%

Valores tabulados de $F: F_{95\%}(14, 16) = 2,37$;

Após a verificação da adequação dos modelos, estes foram reduzidos através da remoção dos termos não significativos. O critério adotado para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do valor de $R^2(adj.)$ e a redução da variância S dos modelos. Assim, os modelos finais apresentaram os formatos descritos pelas equações de 4.2 a 4.6, sendo que a tabela 4.7 indica os novos ajustes obtidos.

$$\begin{aligned}
 P = & 0,018857 + 0,005125Dp - 0,002542V_L - 0,002625Fe + 0,002542A^\circ - 0,001662Dp^2 - \\
 & 0,000662VL^2 - 0,000912Fe^2 - 0,001162A^{\circ 2} + 0,001063DpV_L - 0,000312DpFe - 0,002312 Dp \\
 & A^\circ + 0,000437V_L Fe - 0,000813V_L A^\circ - 0,000188 Fe A^\circ
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 W = & 0,20480 + 0,0012Dp + 0,0000V_L - 0,0006Fe - 0,0012A^\circ - 0,00075Dp^2 + 0,00015VL^2 + \\
 & 0,00015Fe^2 - 0,00075A^{\circ 2} + 0,0000DpV_L + 0,0009DpFe + 0,0009 DpA^\circ + 0,0000V_L Fe + \\
 & 0,0000 V_L A^\circ - 0,0009Fe A^\circ
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
 L = & 3,00014 - 0,00271Dp - 0,00471V_L + 0,01079Fe - -0,00904A^\circ + 0,00127Dp^2 + 0,00189VL^2 \\
 & + 0,00114Fe^2 + 0,00252A^{\circ 2} - 0,00456DpV_L - 0,00256DpFe + 0,00056Dp A^\circ - 0,01719V_L Fe - \\
 & 0,00756V_L A^\circ + 0,00094Fe A^\circ
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned}
 T = & 6,47571 + 0,01625Dp - 0,51375V_L + 0,00625Fe - 0,00042A^\circ - 0,01632Dp^2 + 0,07743VL^2 \\
 & - 0,01132Fe^2 - 0,00632A^{\circ 2} - 0,00687DpV_L - 0,01812DpFe - 0,01813Dp A^\circ - 0,02188V_L Fe + \\
 & 0,00312V_L A^\circ + 0,00688Fe A^\circ
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}
 R = & 0,005 + 0,001839Dp - 0,000391V_L - 0,000193Fe + 0,000307A^\circ - 0,000004Dp^2 + \\
 & 0,000355VL^2 + 0,000496Fe^2 + 0,000402A^{\circ 2} + 0,000617DpV_L - 0,000305DpFe - 0,000273Dp \\
 & A^\circ - 0,000195V_L Fe + 0,000211V_L A^\circ - 0,000164Fe A^\circ
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Tabela 4.7 - Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos finais

Resposta	R ² (adj.) (%)		S	
	Modelo completo	Modelo reduzido	Modelo completo	Modelo reduzido
P	92,76%	96,14%	0,0002	0,0018
W	68,61%	83,26%	0,0001	0,0013
L	50,42%	73,56%	0,0224	0,0163
T	99,01%	99,47%	0,1566	0,0465
R	73,69%	85,97%	0,0000	0,0010

Os resultados da tabela 4.7 indicam que os modelos finais desenvolvidos se caracterizam como expressões de grande confiabilidade, já que todos os modelos, com exceção da largura e comprimento da ranhura, apresentaram ajustes inferiores a 70%. Sendo desconsiderados dos estudos.

4.3.5. Análise dos resíduos

Para garantir que os modelos matemáticos desenvolvidos representem bem as respostas de interesse, a análise dos resíduos se caracteriza como um procedimento importante. Dado que os resíduos são definidos como a diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental observado para uma certa condição. Montgomery (2005) afirma que eles devem ser normais, aleatórios e não correlacionados. Dessa forma, os resíduos relacionados aos modelos reduzidos foram analisados utilizando novamente o *software MINITAB®*. Os resultados desta análise são apresentados pela tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Análise dos resíduos

Análise dos resíduos		Geometria			Produtividade	Qualidade
		P	W	L	T	R
Teste de normalidade	AD	0,356	0,813	0,352	0,275	0,344
	<i>p-value</i>	0,456	0,032	0,446	0,636	0,465
Análise de correlação	Pearson	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	<i>p-value</i>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Análise de aleatoriedade	Causas especiais	*	4	4	*	*

A Figura 4.7 indica que os resíduos são normais para resposta profundidade, comprimento, tempo e rebarba menos para a largura, já que apresentaram coeficientes de Anderson-Darling (AD) menores que um e p -values maiores que 5% de significância. A análise de correlação apresentou todos os coeficientes de *Pearson* iguais a zero e p -values de correlação iguais a um, indicando que os resíduos não são correlacionados. O teste de causas especiais, utilizado para analisar a aleatoriedade dos resíduos apresentou ausência de causas especiais para todas as respostas, com exceção da largura e comprimento. No entanto, como esta causa especial é pouco significativa quanto à previsibilidade dos modelos, pode-se dizer que os resíduos de todas as respostas são também aleatórios. Ao final dessa análise, já que foram caracterizados como normais não correlacionados e aleatórios verificados que os resíduos encontram-se adequados.

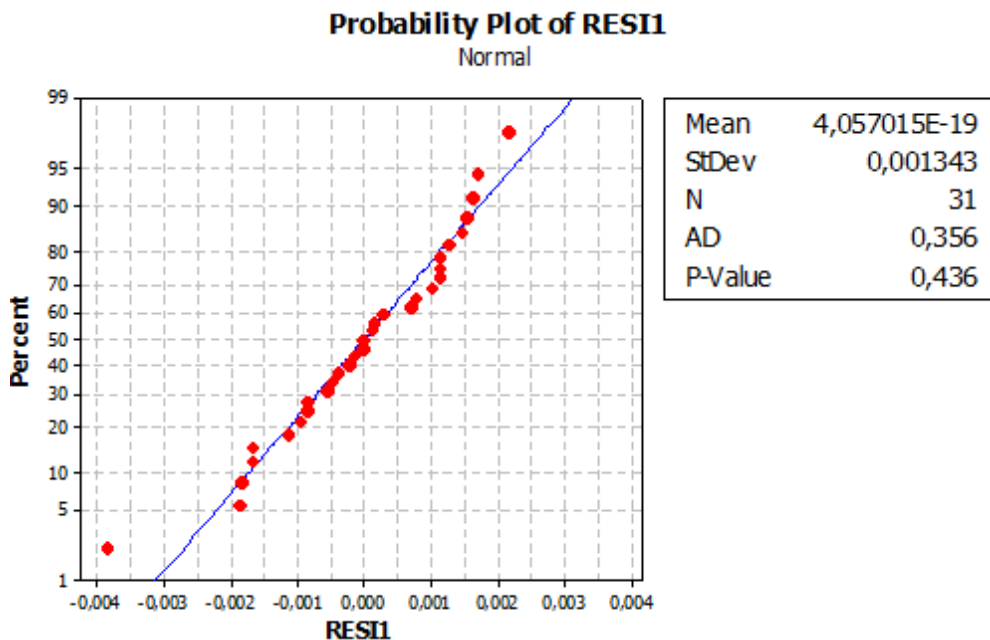


Figura 4.7 – Coeficientes de Anderson-Darling (AD) menores que um e p -values maiores que 5% de significância

4.3.6. Obtenção das superfícies de resposta

Foi empregado o *software* MINITAB® para a construção das superfícies de resposta relacionando os parâmetros estudados com as respostas da geometria, produtividade e qualidade das texturas. As superfícies serão discutidas em maiores detalhes posteriormente junto com a análise das interações entre os parâmetros.

4.3.7. Análise dos efeitos principais dos parâmetros

Foi possível analisar a partir do desenvolvimento dos modelos finais, como as respostas do processo se comportam devido às alterações nos parâmetros de entrada. Através da variação dos parâmetros cujo efeito se deseja estudar, enquanto os demais são mantidos constantes, suas influências sobre as respostas de interesse passam a ser conhecidas. Isto contribui para que informações importantes sobre o processo em análise tornem-se claras. Sendo assim, as influências dos parâmetros sobre a geometria, a produtividade e a qualidade superficial das ranhuras, obtidas através da análise dos modelos desenvolvidos, são discutidas nesta e na próxima seção.

4.3.7.1. Efeitos principais sobre a geometria das ranhuras

Os efeitos principais sobre a geometria conforme as Figuras de 4.8 mostram como a profundidade é influenciada pelos parâmetros do laser com cobertura PVD - Nitreto de Cromo (CrN), aplicado na face de contato do anel de primeira canaleta que geralmente são expostos a maiores cargas mecânicas

Os resultados para a profundidade mostram que todas as curvas apresentaram ponto de curvatura, ou seja, para cada parâmetro foi verificado um rendimento máximo. A distância focal é considerada como o máximo ponto de convergência do feixe. Considera-se que 1 mm abaixo do nível da superfície da peça é o ponto ótimo, mas esta localização pode variar, dependendo da profundidade ser texturizada. Observa-se ainda que a redução da velocidade de aplicação do laser e da frequência de pulsos aliado ao aumento da desfocagem e ângulo, implicam em maiores profundidades das ranhuras. Isto ocorre porque para uma potência fixada, um decréscimo na velocidade origina em um aumento da profundidade. Elevadas velocidades podem originar insuficientes profundidades, enquanto que baixas velocidades conduzem a fusões excessivas do aço ou metal, provocando vaporização e perda de material com a conseqüente formação de defeitos. O gráfico mostra a influência dos parâmetros com a potência do laser fixada.

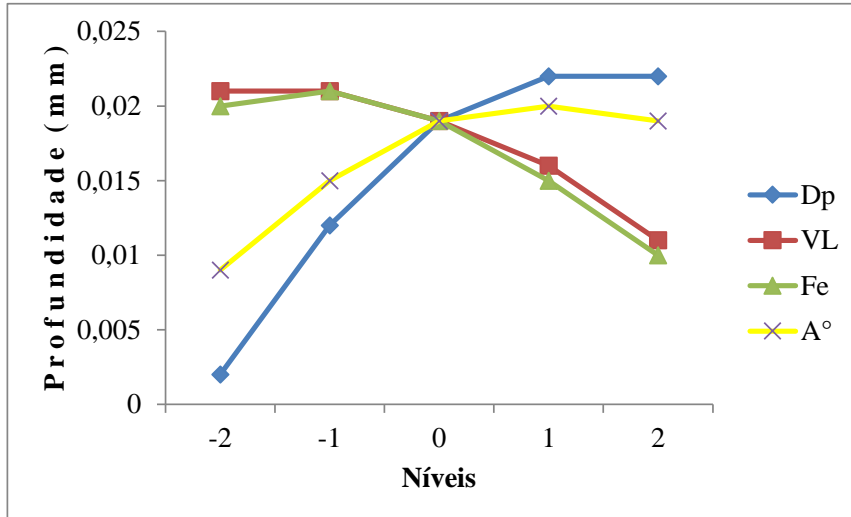


Figura 4.8 – Efeitos principais sobre a profundidade da ranhura

Os resultados para o tempo de aplicação conforme Figura 4.9 mostra que somente a velocidade do laser se caracterizou como um parâmetro significativo para o tempo. Maiores velocidades reduzem o tempo de exposição do laser sobre os anéis de os anéis de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) sendo esta informação suficiente para explicar a redução do tempo em maiores níveis de velocidade de aplicação do laser.

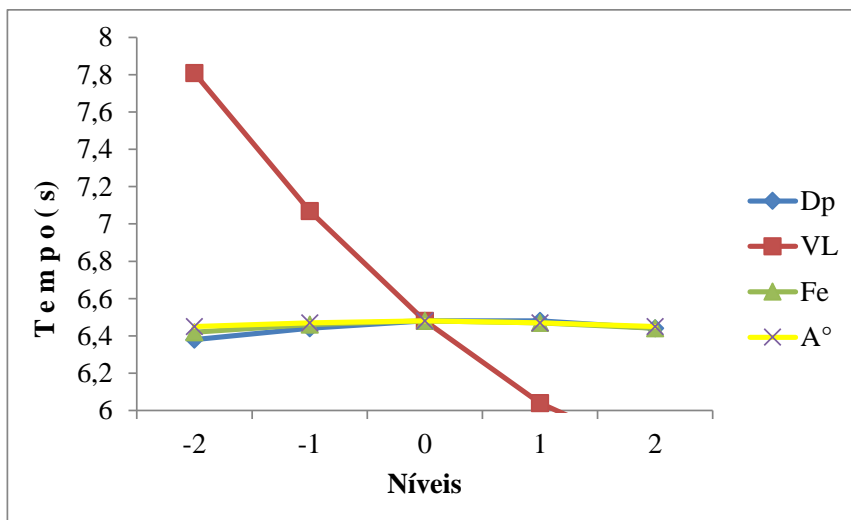


Figura 4.9 – Efeitos principais sobre o tempo de aplicação do laser sobre a ranhura

A obtenção de ranhuras à laser com acabamento de superfície com baixa rugosidade, ausência de rebarbas mantendo as propriedades mecânicas e funcionais originais da peça muitas vezes não é uma tarefa trivial. Além do próprio material e do estado da sua superfície, diversos são os fatores de processo que influenciam nas características da superfície processada, como potência do laser, velocidade de deslocamento, comprimento focal da lente de focalização e posição do foco em relação à superfície. Na Figura 4.10 a influência de

alguns parâmetros em um determinado processo depende da variação de outros. Para o caso de um laser pulsado, ainda podemos acrescentar a energia por pulso, a sua largura temporal e taxa de repetição. Com o aumento da velocidade e distância focal a formação de rebarbas foi reduzida, eliminando a necessidade de retrabalho. Quanto a frequência de pulso e ângulo não tem influência sobre a rebarba, permanecendo inalterados.

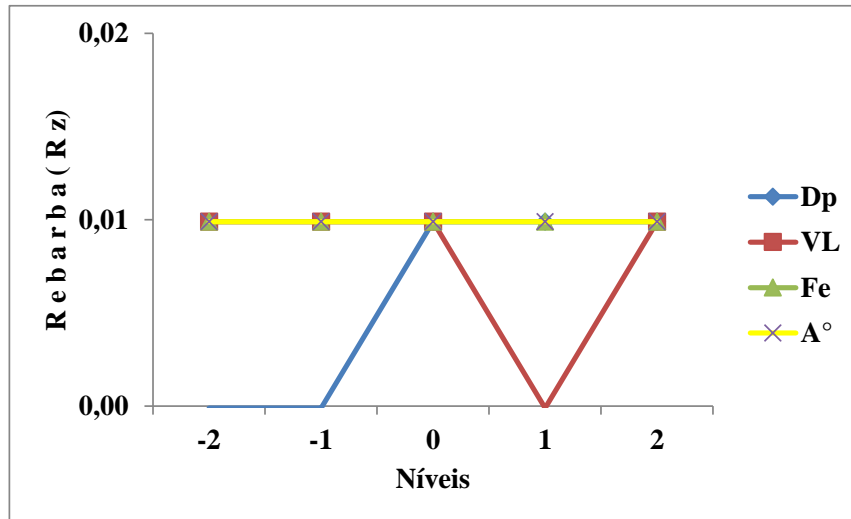


Figura 4.10 – Efeitos principais do levantamento de rebarbas na superfície de contato dos anéis

4.3.8. Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros

A tabela 4.7 mostra que diversas interações entre os parâmetros se comportaram como fatores significativos. O efeito conjunto desses parâmetros influencia de forma significativa os resultados do processo. Sendo assim, a análise sobre as interações foi realizada através das superfícies de resposta desenvolvidas no item 4.4.6.

4.3.8.1. Efeitos das interações sobre a geometria da profundidade das ranhuras

A Figura 4.11 apresenta o efeito conjunto da velocidade do laser e da desfocagem sobre a profundidade da ranhura. Embora a Figura 4.8 tenha mostrado que ambos os parâmetros são influentes sobre esta resposta, observa-se que a interação entre eles também é significativa. Sendo assim, o aumento da velocidade e desfocagem e o aumento da frequência juntamente com o aumento do ângulo, faz com que a profundidade diminua. O mesmo resultado não pode ser atribuído à Figura 4.12, que apresenta a interação entre a Desfocagem e o ângulo em relação à peça sobre a profundidade. Embora o aumento da desfocagem e a diminuição do ângulo e o aumento da frequência e da velocidade provoquem um decréscimo na profundidade, tal efeito não gerou variações consideráveis em comparação ao que foi

observado na Figura 4.12. Portanto, a interação entre a desfocagem e o ângulo exerce influência significativa sobre a profundidade da ranhura sendo que maiores desfocagem e menores ângulos reduzem a profundidade.

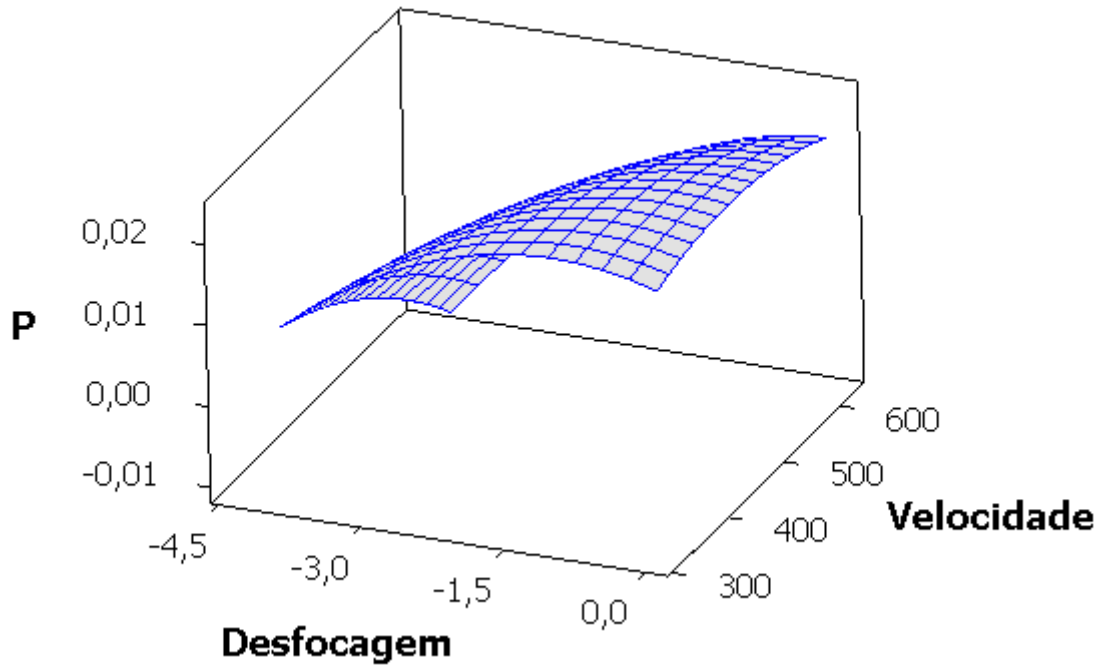


Figura 4.11 – Efeito da interação entre a desfocagem e velocidade de aplicação do laser sobre a profundidade da ranhura ($F_e = 72500$ Hz; $A = 1,5^\circ$)

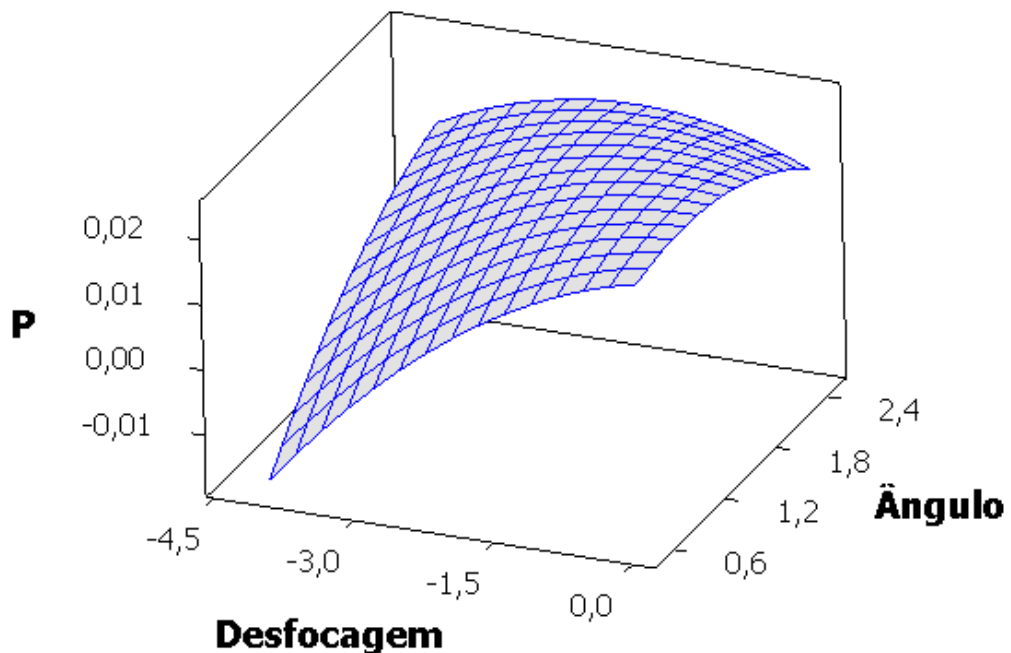


Figura 4.12 – Efeito da interação entre a desfocagem e ângulo sobre a profundidade da ranhura ($F_e = 72500$ Hz; $VL = 475$ m/min)

4.3.8.2. Efeitos das interações sobre a produtividade que relaciona o tempo de exposição do laser na superfície da peça

Outras interações significativas estão representadas através da Figura 4.13. Mostram os efeitos das interações entre os parâmetros desfocagem e velocidade sobre o tempo exposição do laser sobre a superfície da peça, podendo resultar em perda de produtividade e a afetar a qualidade da aplicação. Observa-se que maiores velocidades reduzem o tempo de exposição do laser e maior desfocagem com menores ângulos e alta frequência reduz o tempo do laser na peça resultando em aumento de produtividade. Quanto o efeito é inverso, ou seja, um maior tempo de interação leva a uma maior energia transferida para o material que pode levar a distorção da superfície texturizada.

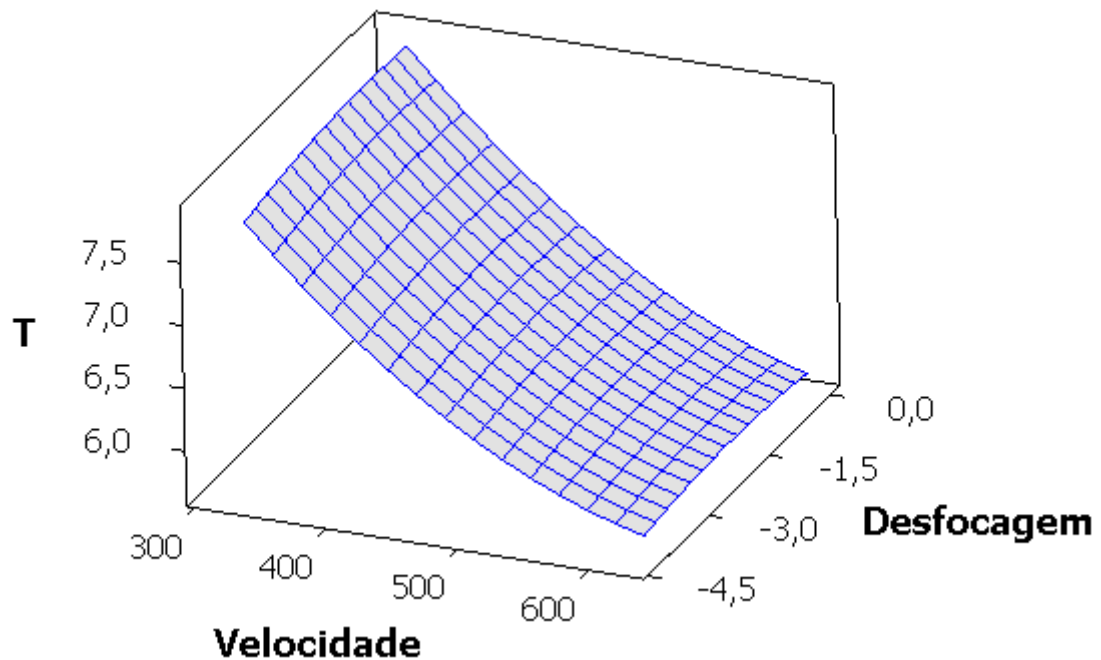


Figura 4.13 – Efeito da interação entre a velocidade e a desfocagem sobre o tempo de exposição do laser na peça (D -2 mm; A = 1,5°)

4.3.8.3. Efeitos das interações sobre a rebarba

As Figuras 4.14 e 4.15 representam os efeitos de algumas interações relacionadas à rebarba no processo de texturização. Considerando a rebarba, verifica-se, que um dos aspectos importantes relacionados à análise das interações. Maiores velocidade de aplicação e maiores frequências eliminam a rebarba. No entanto, a interação entre eles gerou efeitos significativos sobre esta mesma resposta. Sendo assim, conforme Figura 4.15, uma redução da velocidade e

aumento da desfocagem pode resultar em um aumento da rebarba podendo gerar retrabalhos tornando o sistema improdutivo.

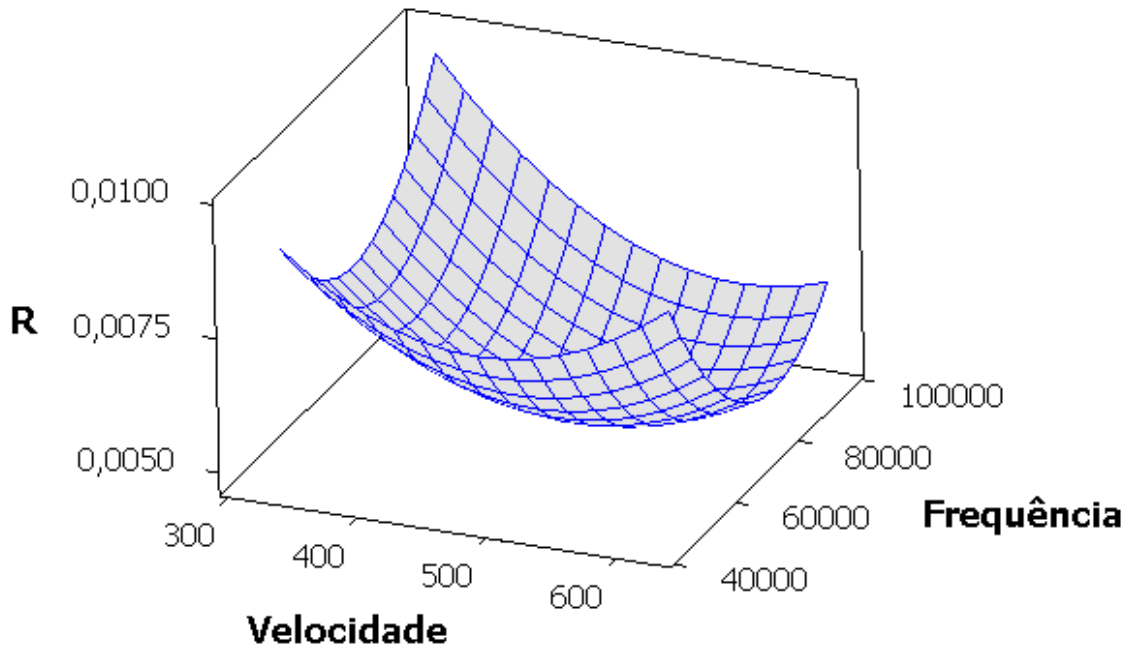


Figura 4.14 – Efeito da interação entre a velocidade e frequência sobre a rebarba ($D = -2 \text{ mm}$ $A = 1,5^\circ$)

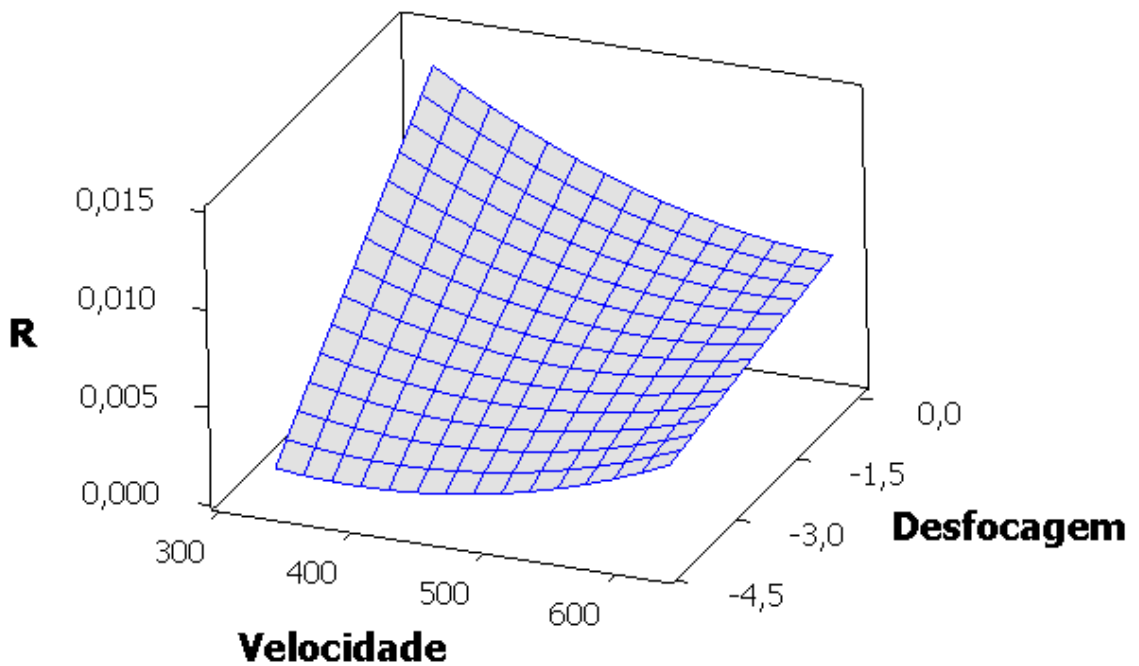


Figura 4.15 – Efeito da interação entre a velocidade e a desfocagem sobre o tempo de exposição do laser na peça ($F_e = 72500 \text{ Hz}$ $A = 1,5^\circ$)

4.3.9. Otimização

Para o processo a análise desenvolvida já apresenta grande relevância, já que a partir da modelagem matemática realizada na fase anterior, muitas informações importantes passam a ser conhecidas. Entre essas informações destacam-se, o conhecimento da influência dos parâmetros sobre as respostas e a identificação das variáveis significativas, que são fatores decisivos para um controle adequado e uma gestão eficiente do processo. Além disso, tendo em mãos modelos confiáveis será possível otimizar os resultados. Nesse contexto, desenvolve-se nesta fase a otimização do processo empregando o E-Method.

Com os objetivos propostos, busca-se a otimização das características geométricas dos reservatórios, garantindo níveis mínimos de qualidade. Portanto, o E-Method aplicado sobre a profundidade da ranhura, a minimização do tempo de aplicação do laser na superfície da peça e o aspecto superficial sem formação de rebarba, material excedente que forma uma faixa estreita em torno da peça, tais respostas foram tratadas como restrições. Sendo assim, as próximas seções desenvolvem as etapas consideradas como a segunda fase do método experimental empregado.

4.3.9.1. Modelos matemáticos desenvolvidos

Após a análise desenvolvida, procede-se com o desenvolvimento dos modelos de superfície de resposta para os mesmos. Sendo assim, as equações de 4.2 a 4.6, descrevem os modelos finais desenvolvidos os quais apresentaram, respectivamente, os modelos para a superfície de resposta e funções objetiva para um $R^2(adj.)$ de 92,76%, 99,01% e 73,69%.

Respostas:

P, T, R

Objetivos:

P= 0,010 mm

T= Minimizar

R= 0

DOE:

$$y(x) = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} F X_i X_j \quad (4.7)$$

$$P = f(D, V, F, A) = \beta_0 + \beta_i * D + \beta_{22} * V + \beta_{33} * V + \beta_{44} * F + \beta_{55} * A \quad (4.8)$$

$$T = f(D, V, F, A) = \beta_0 + \beta_i * D + \beta_{22} * V + \beta_{33} * V + \beta_{44} * F + \beta_{55} * A \quad (4.9)$$

$$R = f(D, V, F, A) = \beta_0 + \beta_i * D + \beta_{22} * V + \beta_{33} * V + \beta_{44} * F + \beta_{55} * A \quad (4.10)$$

Minimizar:

$$T = \beta_0 + \beta_1 * D + \beta_{22} * V + \beta_{33} * V + \beta_{44} * F + \beta_{55} * A \quad (4.11)$$

S.a.:

$$P = 0,010$$

$$R = 0$$

$$X^T X \leq 4,0$$

A modelagem acima foi resolvida através de uma planilha construída no *Microsoft Excel*®, a qual apresentou o seguinte formato descrito pela Figura 4.16.

Modelos Obtidos			
	P	T	R
Termos	Coeficientes	Coeficientes	Coeficientes
Cte	0,018857	6,475710	0,052871
D	0,005125	0,016250	0,008319
V	-0,002542	-0,018543	-0,513750
F	-0,002625	0,000018	0,006250
A	0,002542	-0,116774	-0,000420
D*D	-0,001662	-0,016324	-0,016320
V*V	-0,000662	0,000014	0,077430
F*F	-0,000912	0,000000	-0,011320
A*A	-0,001162	-0,025298	-0,006320
D*V	0,001063	-0,000092	-0,006870
D*F	-0,000313	-0,000001	-0,018120
D*A	-0,002313	-0,036250	-0,018130
V*F	0,000438	0,000000	-0,021880
V*A	-0,000813	0,000083	0,003120
F*A	-0,000188	0,000001	0,006880

Variáveis				
	D	V	F	A
Coded	-1,5620	0,0871	0,5947	1,0950
Uncoded	-3,56	482	79933	2,05

Função objetivo:

P =	0,010
R =	0,00

Restrição:

T =	6,31
------------	-------------

xTx:	4,0000	<=	4
-------------	--------	----	---

Figura 4.16 – Planilha desenvolvida para a otimização da texturização em anéis inoxidável com cobertura em PVD

Baseando-se nos resultados anteriores, a Figura 4.17 descreve a geometria aproximada da textura na condição otimizada do processo.

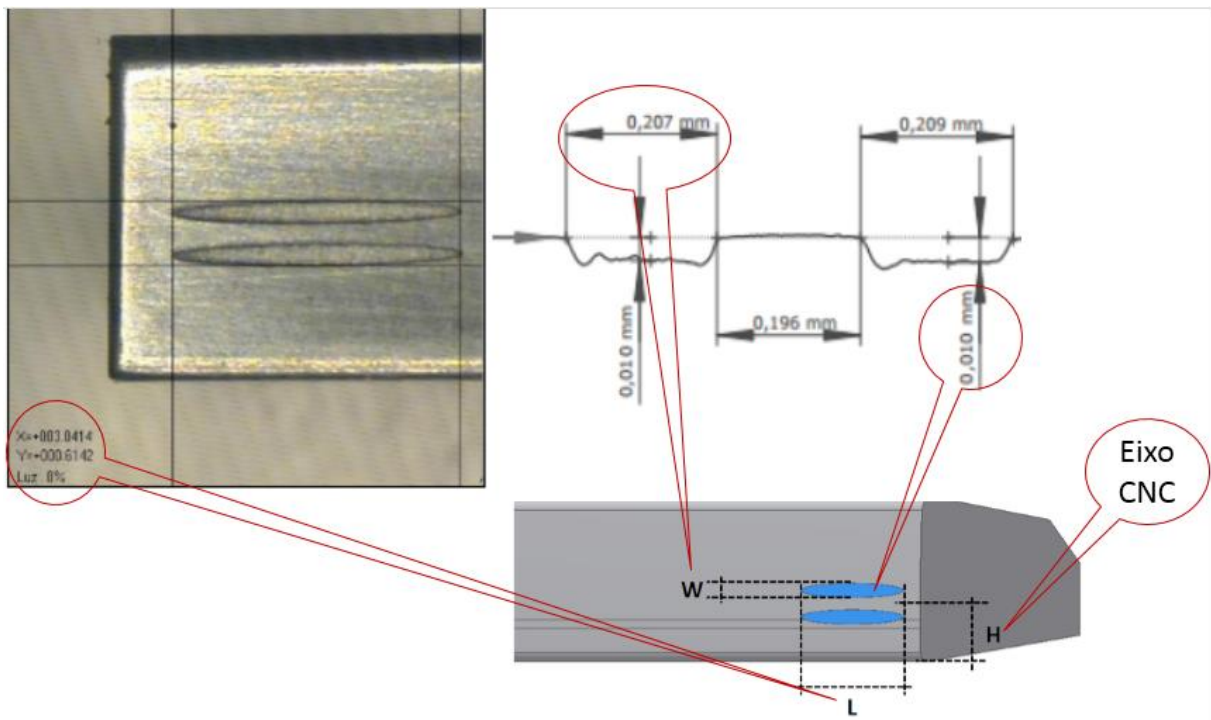


Figura 4.17 – Geometria otimizada para uma profundidade de 0,010 mm

4.3.10. Validação dos resultados

Foram realizados experimentos de confirmação com o objetivo de comparar os resultados reais com os resultados calculados para a condição otimizada. Dessa forma, quatro ranhuras foram texturizadas empregando a combinação ótima dos parâmetros determinada pelo cálculo ($D_p = -3,56$ mm; $V_L = 482$ m/min; $F_e = 79929$ Hz; $A^\circ = 2,05$). Para as demais variáveis do processo, mantiveram-se os parâmetros fixos definidos pela tabela 4.2. Após a execução dos testes e registros das respostas, foram obtidos os seguintes resultados apresentados pela tabela 4.8.

Tabela 4.9 – Resultados dos experimentos de confirmação

Experimento	Geometria			Produtividade	Qualidade
	P	W	L	T	R
1	0,009	0,20	3,02	6,22	0.00
2	0,010	0,20	3,00	6,35	0.00
3	0,011	0,20	2,98	6,57	0.00
4	0,011	0,20	3,01	6,05	0.00
Média	0,010	0,20	3,00	6,29	0.00
Valor previsto	0,010	0,20	3,00	6,31	0.00
Erro	0,00%	0,00%	0,00%	- 0,32%	0,00%

Os experimentos de confirmação mostram que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados teóricos, já que a maior diferença entre eles foi de -0,32%, observada para a produtividade da ranhura. Portanto, na medida em que os valores reais se mostraram condizentes com os valores calculados, ficam validados os resultados obtidos para a otimização do processo de texturização em anéis inoxidáveis com cobertura em PVD. Estende-se essa validação para os modelos matemáticos desenvolvidos e considerando que os mesmos apresentam baixos erros quanto à previsão da geometria, da produtividade e da qualidade superficial das ranhuras que com o aumento da profundidade a rebarba tende a aumentar.

As Figuras 4.18 a 4.21 mostram as ranhuras e o aspecto superficial e a geometria do obtidos na condição otimizada do processo.

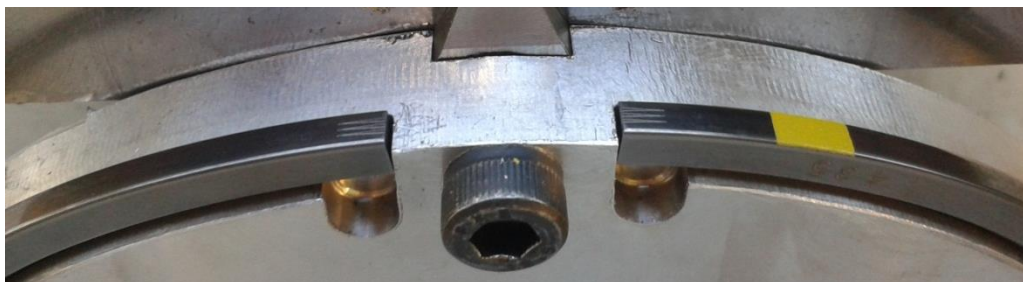


Figura 4.18 – Geometria otimizada

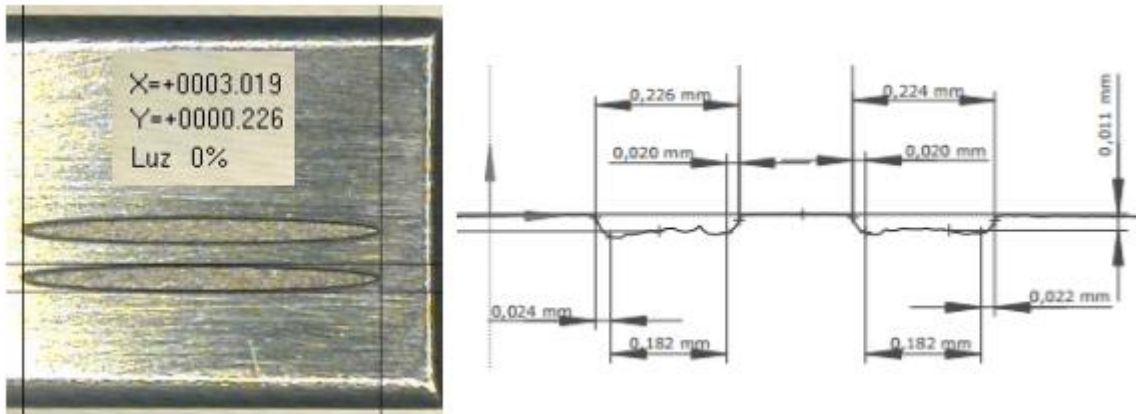


Figura 4.19 – Geometria otimizada (a) ($P= 0,011$ $L= 3.019$ e $L= 0,020$)

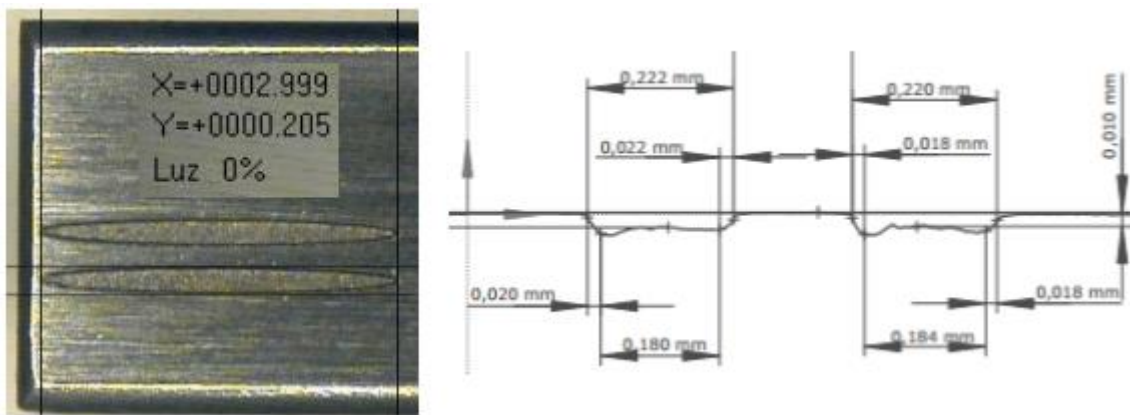


Figura 4.20 – Geometria otimizada (b) ($P= 0,010$ $L= 2.999$ e $L= 0,20$)

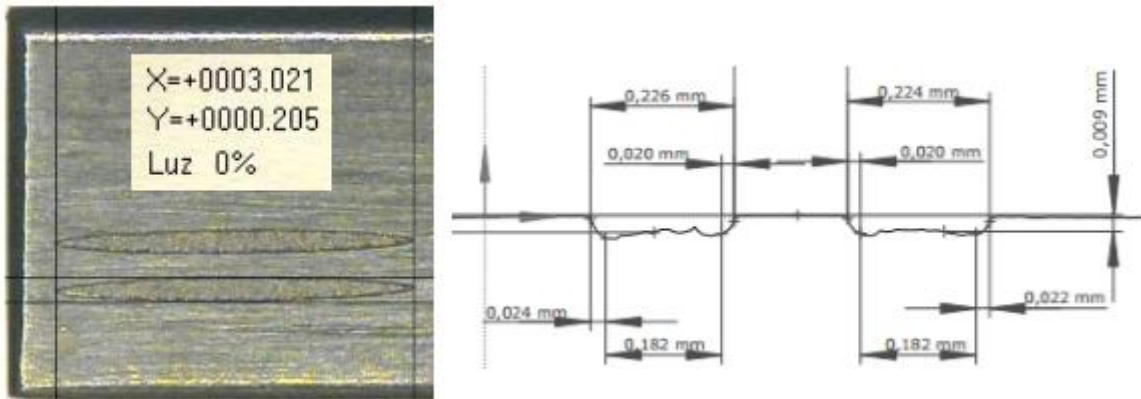


Figura 4.21 – Geometria otimizada (c) ($P= 0,009$ $L= 3.021$ e $L= 0,020$)

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados e discutidos ao longo do capítulo anterior, estabelecem-se, para o presente trabalho, as seguintes conclusões:

- ✓ Os modelos matemáticos desenvolvidos para as respostas de interesse se caracterizaram como expressões de grande confiabilidade, já que apresentaram bons ajustes. Com exceção do comprimento da superfície texturizada, todos os modelos apresentaram ajustes superiores a 90%.
- ✓ Todos os parâmetros analisados apresentaram influência significativa sobre os resultados do processo de texturização a laser.

Considerando os efeitos dos parâmetros para a obtenção dos resultados desejados, foi verificado que: Menores tempos e conseqüente aumento de produtividade podem ser obtidos com o aumento da velocidade e desfocagem além de que menores profundidades são alcançadas aumentando a velocidade.

A análise das interações entre os parâmetros se mostrou como um elemento importante para o controle do processo, evidenciando que a ação conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma dada resposta pode conduzir a efeitos significativos. Portanto esta análise não pode ser negligenciada.

A otimização da texturização a laser em anéis de os anéis de aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN) foi considerada satisfatória.

A estratégia utilizada para a otimização das respostas proposta foi empregada com sucesso para a otimização do problema considerado neste trabalho. Sendo assim, a MSR se mostrou como uma ferramenta eficiente para a otimização apresentando diferentes níveis de importância.

Após a aplicação da otimização, verificou-se que a otimização do processo de texturização é alcançada com o emprego da seguinte combinação dos parâmetros: $D = -3,56$ mm; $V = 482$ m/min; $F = 79929$ Hz; $A^\circ = 2,05$. Nesta condição, são obtidas as seguintes respostas:

- Profundidade: 0,010 mm
- Largura da texturização: 0,20 mm
- Comprimento: 3,00
- Produtividade: 6,31 seg. (Para duas ranhuras)
- Rebarba mínima: 0,00 mm para ($P=0,010$) para ($P=0,20$) a rebarba tende a aumentar.

Os experimentos de confirmação mostraram que a maior diferença entre as respostas reais e as respostas teóricas resultou em 0,32%, observado para a produtividade. Com isso, obteve-se a validação dos resultados ótimos e também dos modelos desenvolvidos para as respostas. Portanto, tais resultados fazem destes modelos expressões úteis para um adequado controle do processo, na medida em que apresentam baixos erros quanto à previsão das respostas.

5.1. Contribuições do trabalho

O desenvolvimento deste estudo permite atribuir para o presente trabalho as seguintes contribuições:

- Obtenção de um procedimento otimizado para a textura que permite a criação de superfícies com propriedades anti corrosivas;
- Incorporação de respostas relacionadas à qualidade e produtividade ao estudo da textura com aços inoxidáveis com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN);
- Obtenção de modelos matemáticos confiáveis que permitem controlar as respostas do processo em função dos parâmetros do laser ND:YAG em anéis de aço com cobertura em PVD - Nitreto de Cromo (CrN);

5.2. Sugestões para estudos futuros

Como sugestões para estudos futuros, ficam as seguintes considerações:

- Avaliação da superfícies texturizadas, com o objetivo de verificar se na zona termicamente afetada (ZTA), quanto a composição química, a dureza, a microestrutura e a resistência à corrosão;
- Análise, do custo no desenvolvimento de equipamentos específicos para realização de texturas para o processo otimizado, visando custo de produção e melhores resultados para o processo;
- Realizar testes com outros materiais e outros tipos de cobertura, visando a aplicabilidade do método.
- Caracterizar os efeitos físicos da variação dos parâmetros laser;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAI, S.X.; PENG, X.D. LI, J.Y. MENG, X.K. *Experimental study on hydrodynamic effect of orientation micro-pored surfaces*. Science China – Technological Sciences, v. 54, n 3, 659-662, 2012.
- BALASUBRAMANIAN, V. et al. *Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel*. International Journal of Iron and Steel Research, v. 16, n. 1, p. 44-53, 2009a.
- BALASUBRAMANIAN, V. et al. *Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based an quantitative and qualitative factors*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 40, n. 9-10, p. 887-897, 2009b.
- BARIL, C.; YACOUT, S. e CLÉMENT, B. *Design for Six Sigma through collaborative multiobjective optimization*. Computers & Industrial Engineering, v. 60, n. 1, p. 43-55, 2011.
- BENEDICT, G.F. *Nontraditional Manufacturing Processes*. Marcel Dekker, inc., New York, 1987.
- BOX, G. E. P. e DRAPER, N. R. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. John Wiley & Sons, 1987. 650p.
- BRIZMER, V., KLIGERMAN, Y., ETSION, I. *A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing*. Tribology Transactions, vol. 46, 3, 397-403, 2003.
- BRUNO, R., FARIA, G., SILVA, D., *Improvements on ring pack performance by using PVD coating*. SAE paper 2013-36-0374 (2013).
- BYUN, J.W. et al. *Surface texturing by micro ECM for friction reduction*. Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v. 11, no. 5, pp. 747 – 753, 2010.
- CHEN, C.; CHUNG, C.; WU, B. *Microstructure and lubricating property of ultra-fast laser pulse textured silicon carbide seals*. Applied Physics A, v. 107 pp. 345 – 350, 2012.
- CSELE, M. *Fundamentals of light sources and lasers*, John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 232-235 and 315-314; 2004.
- CORREIA, D.S. et al. *Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization*. Journal of Materials Processing Technology, v. 160, n. 1, p. 70-76, 2005.
- DING, Q.; WANG, L. WANG, Y. *Improved Tribological Behavior of DLC Films Under Water Lubrication by Surface Texturing*. Tribology Letters, v.31, pp. 439 – 449, 2010.
- ETSION, I.; KLIGERMAN, Y.; HALPERIN, G.: *Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces*. Tribol. Trans. 42, 511–516, 1999.
- ETSION I. & SHER E. *Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings*. Tribol Int, 42:542–547, 2009.

FERRARESE, A. & ROVAI, F. *Oil ring design influence on lube oil consumption of SI engines*. ASME ICEF2004-868, Sacramento - EUA, 2004.

FOWELL, M. et al. *Entrainment and inlet suction: Two mechanisms of hydrodynamic lubrication in textured bearings*. Transactions of the ASME. Vol. 129, April 2007.

HSIAO, W. TSENG, S. HUANG, D. *Pulsed Nd : YAG laser treatment of monocrystalline silicon substrate*. Springer-Verlag London Limited, pp 223 – 231, 2011.

HU, T.; HU, L; DING, K. *Effective solution for the tribological problems of Ti-6Al-4V: Combination of laser surface texturing and solid lubricant film*. Surface and Coatings Technology, v. 206, pp 5060 – 5066; 2012.

HSU, SM. *Surface texturing: principles and design*. Maryland, USA: National Institute of Standards & Technology; November 6, 2006.

IANG, J.; XUE, L; WANG, S. *Discrete laser spot transformation hardening of AISI O1 tool steel using pulsed Nd:YAG laser*. Surface and Coatings Technology, v. 205, pp 5156 – 5164, 2011.

ISI Web of Knowledge Disponível em: <http://apps.webofknowledge.com> Acessado em 20/11/2014.

ISO 6621a 6626. *International Organization for Standardization – Pistons Rings*. 1984.

KONAK, S. K.; SMITH, A. E. e NORMAN, B. A. *Multi-objective tabu search using a multinomial probability mass function*. European Journal of Operational Research, v. 169, n. 3, p. 918-931, 2006.

LAMRAQUI, A.; COSTIL, S., LANGRADE, C. *Laser surface texturing (LST) treatment before thermal spraying: A new process to improve the substrate-coating adherence*. Surface and Coatings Technology, v.205, p.4, 2010.

LAKSHMINARAYANAN, A. K. & BALASUBRAMANIAN, V. *Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 19, n. 1, p. 9-18, 2009.

LI, D.; YANG, J. B. e BISWAL, M. P. *Quantitative parametric connections between methods for generating noninferior solutions in multiobjective optimization*. European Journal of Operational Research, v. 117, n. 1, p. 84-99, 1999.

Manual TruMark Série 6000 OEM Edição 2013-07-04 N° de documento KH-PT-210.

MIETTINEN, K. *Nonlinear multiobjective optimization*. Boston: Kluwer, 1999, 320 p.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 6 ed. New York: John Wiley, 643 p, 2005.

NAKANO et al. *Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions*. Tribology Letters, v. 28, pp. 131-137; 2007.

- NILO JÚNIOR, L. P. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. 111 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. *Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW*. Journal of Materials Processing Technology, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.
- PAIVA, A. P. *Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processo de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas*, 229 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- PAIVA, E. J. *Otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas baseada em índices de capacidade*, 118 p. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- PAITAL, S.; SAMEER W. HE, DAHOTRE, N. *Laser pulse dependent micro textured calcium phosphate coatings for improved wettability and cell compatibility*. Journal of materials science. Materials in medicine, v. 21, pp 2187 – 200, 2010.
- PODGORNIK, B. et al. *Effectiveness and design of surface texturing for different lubrication regimes*. Springer Science+Business Media B.V. Mechanic 47:1613–1622. DOI 10.1007/s11012-012-9540-7, 2012.
- PHOTONICS, IPG. 2013. Disponível em: <http://www.ipgphotonics.com/>. Acessado dia: 25/03/2013.
- QIAN, S. et al. *Generating micro-dimples array on the hard chrome-coated surface by modified through mask electrochemical micromachining*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 47, pp. 1121-1127, 2010.
- RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009, 840 p.
- RODRIGUES, L. O.; PAIVA, A. P.; COSTA, S. C. *Otimização do processo de soldagem com eletrodo tubular através da análise da geometria do cordão de solda*. Soldagem &Inspeção, v. 13, n. 2, p. 118-127, 2008.
- ROMOLY, L.; RASHED, C.A.A.; FIASCHI, M. *Experimental characterization of the inner surface in micro-drilling of spray holes: A comparison of ultra-short pulsed laser and EDM*. Optics and Laser Technology, 56, pp. 35-42; 2014.
- RYK, G. ETSION, I. *Testing Piston Rings with Partial Laser Surface Texturing for Friction Reduction*. Wear 261, 792-796, 2006.
- SA, L. & FERRARESE, A. *Ring pack for downsized spark ignition engines*. SAE paper 36-0157, 2011.
- SCARAGGI, M. *Texture surface hydrodynamic lubrication: Discussion*. Tribology Letters, 48, 375-391, 2012.

- SANCHIS, J.; MARTÍNEZ, M. A.; BLASCO, X. e MEZA, G. R. *Modelling preferences in multi-objective engineering design*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 23, n. 8, p. 1255-1264, 2010.
- SHIN, H.; CHOI, S.; KIN, *Hybrid (LASER + CNC) process for lubricant groove on linear guides*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.46 pp 1001 – 1008, 2009.
- STACHOWIAK, G. & POSDSIADLO, P. – *3-D characterization, optimization, and classification of textured surfaces*. Tribology Letters, 32, 13-21, 2008.
- TOMANIK, E. *Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes*. Tribology International n°. 41 (11):1032-1038, 2008.
- TOMANIK, E. & FERRARESE, A., *Low friction ring pack for gasoline engines*.ASME Technical Paper ICEF2006-1566, 2006.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção*. Universidade Federal de Itajubá. 2012.
- TRUMPF. Disponível em: <http://www.trumpf-laser.com/>. Acessado dia: 20/10/2013, 2013.
- VANCONI, L.; DEMIR, A.; PREVITALI, B. *Wear Behavior of Fiber Laser Textured TiN Coatings in a Heavy Loaded Sliding Regime*, Materials v. 5, pp 2360 – 2382; 2012.
- VATAVUK, J. *Mecanismo de Desgaste em Anéis de Pistão e Cilindros de Motores de Combustão Interna*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica Universidade de São Paulo, Brasil, 1994.
- VILHENA, L.; SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B. *Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser*. Tribology International, V. 42, pp. 1496 – 1504; 2009.
- YU, H.; WANG X.; FEI, Z. *Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces*." Springer Tribology Letters no. 37:123–130,2010.