



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Itajubá

LUCAS ROGÉRIO EMILIANO

**Otimização da retificação das pontas dos anéis de
pistão de aço inoxidável martensítico com
cobertura de nitreto de cromo**

Itajubá
Outubro de 2022



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Itajubá

LUCAS ROGÉRIO EMILIANO

**Otimização da retificação das pontas dos anéis de
pistão de aço inoxidável martensítico com
cobertura de nitreto de cromo**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: João Roberto Ferreira

Co-orientador: Luís Felipe dos Santos Carollo

Itajubá

Outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, por ter me proporcionado ânimo, saúde e forças para concluir essa caminhada.

À minha família por sempre me apoiar e pela compreensão nos momentos de ausência, em especial aos meus pais Alex Rogério e Maria Valdilene pelo amor incondicional.

Aos meus amigos que até hoje a vida me proporcionou, que compartilharam das alegrias, tristezas, angústias e conquistas, tornando a jornada da vida mais leve.

Ao meu orientador João Roberto Ferreira e meu co-orientador Luís Felipe dos Santos Carollo pela disponibilidade para me orientar, pela paciência, conselhos e ensinamentos que foram essenciais nesta jornada.

Aos professores membros da banca avaliadora, Dr. Marcos Valério Ribeiro e Dr. Sebastião Simões da Cunha Júnior, por aceitarem o convite, dispondo de tempo e conhecimento.

Ao professor Dr. Alexandre Fonseca Torres, pelas contribuições que foram essenciais no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À Cassia Cristina Goulart Dos Santos, pelo exímio atendimento e auxílio em toda a parte burocrática.

À UNIFEI pela infraestrutura necessária para o desenvolvimento das atividades de pesquisa, a todos os professores que se dedicaram em compartilhar do seu conhecimento e aos seus servidores em geral.

À empresa Mahle Metal Leve S/A pela aquisição de diversos materiais de custeio e de capital, assim como pela disposição de equipamentos que possibilitaram análises essenciais ao desenvolvimento desse projeto.

Com vocês divido a alegria desta experiência!

RESUMO

No âmbito da indústria automobilística, os processos de usinagem são amplamente aplicados. Dentre estes, o processo de retificação é muito utilizado para acabamento em peças que necessitam de baixa rugosidade e tolerância dimensional, tendo como premissa atender as características de produto e reduzir ao máximo as perdas, ou seja, garantir a qualidade e reduzir custos de fabricação. Neste contexto, este trabalho apresenta uma abordagem estratégica para reduzir a variabilidade no processo de retificação das pontas dos anéis de pistão de aço inoxidável martensítico nitretado (MS066-N1), com revestimento de nitreto de cromo (CrN), aplicado pelo processo de deposição física de vapor (PVD). Neste trabalho, criou-se um planejamento experimental (DOE), na configuração da metodologia de Superfície de Resposta com 3 níveis e 3 fatores. As variáveis de entrada foram os tamanhos dos grãos abrasivos do rebolo de CBN (*Cubic boron nitride*), a rotação (RPM) e o avanço de usinagem (GPM – golpes por minuto). A metodologia aplicada no planejamento experimental, auxilia na definição da parametrização ótima de usinagem, visando diminuir a variabilidade do processo e atingir a estabilidade dimensional na média da especificação da característica folga entre pontas de anéis de pistão. Os parâmetros de otimização mais próximos e disponíveis na máquina foram com rebolo de CBN de tamanho de grão B46, rotação de 5200 RPM e avanço de usinagem 9,0 GPM. Para validar os parâmetros de otimização realizou-se uma análise de capacidade através dos índices de Cp, Cpk e Pp e Ppk, em que o processo atingiu a estabilidade esperada com redução do percentual de peças fora de especificação de 5,79% para 0,00%.

Palavras-chave: Retificação, Anéis de pistão, Aço inoxidável martensítico, Folga entre pontas, Otimização de processo.

ABSTRACT

In the scope within in the automotive industry the machining processes are widely applied. Among them, the grinding process is widely used for finishing parts that require low roughness and dimensional tolerance, with the premise of achieve product features and reducing losses as much as possible that is, assurance the product quality and reduce manufacturing costs. In this context, this work presents a strategical approach to reduce variability in the grinding process of the tips of nitrided martensitic stainless steel (MS066-N1) piston rings, with chromium nitride (CrN) coated applied by the physical vapor deposition process (PVD). In this work, an experimental design (DOE) was created, in the Response Surface methodology configuration with 3 levels and 3 factors. The input variables were the abrasive grain size of CBN grinding wheel, the grinding wheel rotation parameter (RPM) and the feed parameter (GPM). The methodology applied was experimental planning, which support in defining the optimal machine parameterization, aiming to reduce the process variability and reach dimensional features stability in the specification average of the characteristic gap between piston rings tips. The closest optimization parameters and available on the machine was with abrasive grain size of CBN grinding wheel (B46), the grinding wheel rotation speed parameter (5200 RPM) and the feed parameter (9,0 GPM). To validate the optimization parameters, a study of capability analysis was created which demonstrated through the levels of C_p , C_{pk} and P_p , P_{pk} , that the process reached the expected stability, where the percentage of parts outside the specified or defective was reduced from 5,79% to 0,00%.

Keywords: Grinding processes, Piston Rings, Martensitic stainless steel, Closed gap, Optimization parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação ilustrativa dos seis elementos básicos do processo de retificação. ...8	8
Figura 2 – Representação das etapas da formação de cavaco. 10	10
Figura 3 – Retificação cilíndrica. 12	12
Figura 4 – Rebolos. 16	16
Figura 5 - Tipo de estruturas de rebolos. 21	21
Figura 6 - Descrição de rebolos. 23	23
Figura 7 - Mecanismos de desgaste de rebolo. 24	24
Figura 8 - Arranjo composto central. 30	30
Figura 9 - Diferentes estruturas de arranjo composto central. 30	30
Figura 10 – Gráfico de pareto, 32	32
Figura 11 - Tipos de anéis no pistão. 36	36
Figura 12 - Características e nomenclatura dos anéis. 37	37
Figura 13 – Microestrutura de um material após a nitretação gasosa. 40	40
Figura 14 – Revestimento PVD. 40	40
Figura 15: Secção transversal do anel de pistão após nitretação (50x) e detalhe da região nitretada (200x). 43	43
Figura 16: Secção transversal do anel de pistão após aplicação de nitreto de cromo (50x) e detalhe do revestimento (500x) 43	43
Figura 17 - Folga entre pontas nos anéis de pistão. 44	44
Figura 18 – Representação das características dos anéis de pistão 45	45
Figura 19 – Retificadora e seus componentes 45	45
Figura 20 – Bucha para alojamento das peças e representação da usinagem. 46	46
Figura 21 – Exemplo de rebolo utilizado no experimento 47	47
Figura 22 – Equipamentos para a medição da folga entre pontas 48	48
Figura 23 - Folga entre pontas do anel confinado no calibre 48	48
Figura 24 – Medição da característica de folga entre pontas. 49	49
Figura 25 - Fluxograma com os principais passos da pesquisa. 50	50
Figura 26 - Fluxograma para geração da matriz DOE 51	51
Figura 27 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis de entrada 57	57
Figura 28 - Efeitos principais das variáveis de entrada na resposta 57	57
Figura 29 - Superfície de resposta para folga entre pontas versus avanço e rotação (Rebolo B46) 58	58

Figura 30 - Superfície de resposta para folga entre pontas versus avanço e rotação (Rebolo B64)	59
Figura 31 - Superfície de resposta para folga entre pontas versus avanço e rotação (Rebolo B76)	59
Figura 32 – Folga entre pontas versus interação das variáveis de entrada.....	60
Figura 33 - Gráfico de otimização de processo	61
Figura 34 – Lasca na face das pontas dos anéis	62
Figura 35 - Índices de capacidade antes da operação de retificação de topo (RTOP)	64
Figura 36 - Índices de capacidade depois da operação de retificação	64
Figura 37 - Análise de capacidade antes e depois da retificação	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetro médio de grãos abrasivos de acordo com a classificação FEPA.....	19
Tabela 2 - Classificação quanto à dureza de rebolos.....	20
Tabela 3 - Tipos de arranjo de CCD.....	31
Tabela 4 - Condições de processo de acordo com os valores de Cp e Cpk.....	34
Tabela 5: Composição química do aço inoxidável MS066-1.....	42
Tabela 6: Dureza Vickers do MS066-N1	42
Tabela 7: Especificações da máquina.....	46
Tabela 8: Especificação dos rebolos.....	47
Tabela 9 - Definição de parâmetros de usinagem.....	50
Tabela 10 – Matriz de experimentos	52
Tabela 11 – Matriz de experimentos (continuação)	53
Tabela 12 – Valores de R^2 e $R^2(aj)$ para as diferentes variáveis de resposta.....	54
Tabela 13: Análise de variância para folga entre pontas dos anéis de pistão.....	56
Tabela 14 – Análise de capacidade antes e depois da retificação.....	63

LISTA DE ESQUEMAS

Esquema 1 – Características de entrada e saída do processo de retificação.....	11
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	Avanço (GPM)
a_e	Profundidade de corte real
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institution</i>
CBN	<i>Cubic boron nitride</i>
CCD	Arranjo central composto - <i>Central Composite Design</i>
CrN	Nitreto de Cromo
DBB	<i>Box-Behnken</i>
DLC	<i>Diamond Like Carbon</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
FEPA	<i>Federation of European Producers of Abrasives</i>
GPM	Golpes por minuto
HV	Valor de dureza Vickers
HRC	Valor de dureza Rockwell
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	Normas industriais japonesas
Lg	Comprimento do arco de contato
MSR	Metodologia de superfície de resposta
MS066-N1	Nomenclatura do material (específico da empresa)
n	Rotação do rebolo (RPM)
PACVD	<i>Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition</i>
PVD	Deposição física de vapor
Q	Taxa de remoção de material
RTOP	Retificação de topo

\bar{S}_1	Média da folga entre pontas
SiC	Carbeto de silício
V_c	Velocidade de corte [m/s]
V_f	Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço de usinagem [GPM]
V_w	Velocidade tangencial da peça [m/min]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Objetivos.....	6
1.1.1. Objetivo Geral.....	6
1.1.2. Objetivos específicos.....	6
1.2. Justificativas.....	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Processo de Retificação	7
2.2. Elementos Básicos do Processo de Retificação	8
2.3. Formação de Cavaco.....	9
2.4. Parametrização do processo de retificação	11
2.4.1. <i>Velocidade de corte ou velocidade tangencial do rebolo (V_c)</i>	12
2.4.2. <i>Velocidade tangencial da peça (V_w)</i>	13
2.4.3. <i>Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço de usinagem (V_f)</i>	13
2.4.4. <i>Profundidade real de corte (a_e)</i>	14
2.4.5. <i>Comprimento do arco de contato (L_g)</i>	14
2.4.6. <i>Taxa de remoção de material (Q)</i>	15
2.5. Rebolos	15
2.5.1. <i>Tipo de grão</i>	17
2.5.2. <i>Tamanho de grão</i>	18
2.5.3. <i>Dureza do rebolo</i>	20
2.5.4. <i>Estrutura do rebolo</i>	21
2.5.5. <i>Tipo de Ligante</i>	21
2.5.6. <i>Descrição do Rebolo</i>	23
2.5.7. <i>Mecanismo de Desgaste do Rebolo</i>	24
2.6. Otimização de Processos	25
2.6.1. <i>Projeto de Experimentos (DOE)</i>	27

2.6.2.	<i>Metodologia de superfície de resposta</i>	28
2.6.2.1.	<i>Arranjos Experimentais para Superfície de Resposta</i>	29
2.6.3.	<i>Desirability</i>	31
2.6.4.	<i>Gráfico de Pareto</i>	32
2.7.	Índices de Capacidade	32
2.8.	Anéis de pistão	35
2.8.1.	<i>Tendências de inovação e desenvolvimento de anéis de pistão</i>	38
2.8.2.	<i>Nitretação</i>	39
2.8.3.	<i>O processo de PVD (Physical Vapor Deposition)</i>	40
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.1.	Objeto de Estudo.....	42
3.2.	Característica de Resposta - Folga Entre Pontas	44
3.3.	Máquina e Processo de Usinagem	45
3.4.	Rebolo	47
3.5.	Sistema de Medição	48
3.6.	Metodologia Experimental	49
3.6.1.	<i>Definição dos fatores</i>	50
3.6.2.	<i>Definição do tamanho amostral e matriz experimental</i>	51
3.6.3.	<i>Realização do experimento</i>	53
4.	RESULTADOS	54
4.1.	Análise preliminar dos modelos de variáveis de resposta	54
4.2.	Modelo da dimensão média de folga entre pontas.....	55
4.3	Parâmetros de otimização do processo.....	60
4.4	Validação dos parâmetros otimizados	61
5.	CONCLUSÃO	66
	Perspectivas	66
	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

A corrida acelerada pela excelência na produção ocorre em escala mundial no meio industrial. Diversas indústrias de diferentes ramos, como por exemplo a indústria metalmeccânica, buscam constantemente otimizar os processos industriais de forma a agregarem maior valor aos serviços, processos e produtos finais. Os processos de fabricação são essenciais para a maximização da produtividade e minimização do custo com insumos, mantendo os padrões de qualidade exigidos pelos clientes ou órgãos de certificação (DOS ANJOS, 2016).

Dentro dos processos de fabricação, a usinagem por retificação tem sido realizada para atender formas geométricas e tolerâncias dimensionais com elevada precisão em produtos e ferramentais no setor automotivo. A retificação é um processo de usinagem por abrasão que corrige as irregularidades que peças podem apresentar em suas superfícies, sendo usualmente alocada entre as últimas operações do fluxo produtivo. A retificação é um dos processos de usinagem de mais alta precisão, com competência de produzir peças com elevado acerto geométrico e dimensional (OLIVEIRA *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2018).

A utilização de ferramentas estatísticas para avaliação e identificação de fontes de variabilidade nestes processos é fundamental, verificando se o processo é, ou não, capaz de atender às solicitações do cliente. Ferramentas estatísticas são frequentemente usadas para análise de tolerância. As análises de capacidade do processo são realizadas para representar a consistência do processo e sua capacidade de fabricar produtos que estejam dentro dos limites das especificações (MAHSHID; MANSOURVAR; HANSEN, 2018).

O processo de retificação é constituído por seis elementos básicos: máquina retificadora, rebolo, peça obra, resíduos da retificação, fluido de corte e atmosfera. Estes elementos devem ser selecionados para conduzir um processo eficiente e seu desempenho depende do processo de dressagem, ou seja, o modo de condicionamento da superfície do rebolo visando a sua remodelação e conduzindo-o à uma topografia adequada (MARINESCU *et al.*, 2016; NIE *et al.*, 2018).

A otimização de qualquer processo visa encontrar resultados que definem os melhores padrões de operação, formalizando a produção. Ao padronizar um experimento é preciso ter variáveis controladas no processo, com o objetivo de observar a resposta a cada alteração realizada e definir o trajeto que cada etapa deverá seguir até atingir as melhorias esperadas. É de extrema importância a escolha correta das ferramentas e de seus parâmetros nos processos

de fabricação, como por exemplo, nos processos de usinagem se deve acompanhar as inovações tecnológicas, como uma exigência da alta competitividade nesta área (WERKEMA; AGUIAR, 1996; PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014).

Devido à importância do processo de retificação industrial, este presente trabalho tem como objetivo apresentar uma abordagem prática desse processo aplicado ao setor automotivo para usinagem de anéis de pistão para veículos. Os principais parâmetros que influenciam o processo de retificação foram testados por meio do planejamento de experimentos (DOE – *Design of Experiments*). Esta técnica é utilizada objetivando melhorar as características de qualidade de produtos e processos, reduzir o número de experimentos e otimizar a utilização de recursos; envolvendo a construção da matriz experimental, definindo a maneira ideal para a amostragem, incluindo a coleta de dados, as análises e tomadas de decisões de um dos principais produtos manufaturados na indústria automotiva, que produz o objeto desse estudo, o anel de pistão (MONTGOMERY, 2013). A técnica DOE possibilita determinar o número mínimo de experimentos necessários (KLEIJNEN, 2005).

Este trabalho encontra-se estruturado em sete itens, sendo o primeiro item, um texto introdutório, a justificativa do estudo e os objetivos, geral e específico, do trabalho; seguido do segundo item, sendo a fundamentação teórica necessária para que seja possível compreender os principais conceitos e métodos abordados no tema em estudo (abordam-se os seguintes tópicos: processo de retificação e seus elementos básicos, formação de cavaco, parametrização do processo de retificação, rebolos, otimização de processos, projeto de experimentos, índice de capacidade e anéis de pistão). A metodologia de pesquisa utilizada é descrita no item três, abordando uma explicação sobre o método de pesquisa empregado (DOE), informações como origem, aplicações, características, vantagens e desvantagens; além disso, são apresentados, os passos para o planejamento e realização da pesquisa definida, desde a estruturação até a análise dos resultados. No item quatro são apresentados os resultados obtidos na pesquisa, a partir dos relatórios gerados durante a execução do trabalho. Por fim, no item cinco são relatados os comentários finais e perspectivas do estudo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é reduzir a variabilidade da dimensão da folga entre pontas de anéis de pistão de aço inoxidável martensítico nitretado e revestidos com CrN, otimizando os parâmetros do processo de retificação de mergulho das pontas dos anéis de pistão.

1.1.2. Objetivos específicos

O objetivo específico deste trabalho é definir o ponto ótimo para os parâmetros de avanço de usinagem (GPM), tamanho de grão abrasivo e rotação do rebolo, para atingir a estabilidade dimensional no processo de retificação das pontas de anéis de pistão, fabricados em aço inoxidável martensítico nitretado e revestidos com CrN. Tendo como validação dos resultados a comparação entre os estudos de capacidade da característica de folga entre pontas antes e após a operação de retificação com os parâmetros otimizados. Ou seja, conhecer a variabilidade dimensional das peças antes de retificar e comparar com a dispersão da característica após a retificação utilizando os parâmetros otimizados neste trabalho.

1.2. Justificativas

Baseado no cenário exposto pela literatura na introdução, sobre a competitividade assídua entre as empresas do ramo de autopeças e a busca pela redução dos custos de fabricação sem afetar a qualidade de seus produtos. Este trabalho tem como proposta contribuir com a jornada *Lean Manufacturing* da empresa, tendo como foco principal desenvolver um processo robusto de retificação das pontas dos anéis de pistão, fabricados em aço inoxidável martensítico nitretado e revestidos com CrN, após a aplicação do revestimento por meio do processo de PVD (*Physical Vapor Deposition*). Processo de usinagem ainda não aplicado a essa tecnologia de produtos, nessa etapa do processo de fabricação. Porém tendo em vista o aumento da demanda do mercado por produtos com tolerâncias reduzidas para a característica de folga entre pontas, faz-se necessário definir os parâmetros ótimos para este processo. Visando neste sentido a capacidade do processo de fornecer produtos de qualidade e com custos de fabricação competitivos para mercado global do setor automotivo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processo de Retificação

O processo de retificação é uma usinagem por abrasão que corrige as irregularidades que peças podem apresentar em suas superfícies. Este processo tem por objetivo reduzir rugosidades ou saliências e rebaixos de superfícies usinadas por método de remoção de material com auxílio de grãos abrasivos duros aglomerados, utilizando uma ferramenta de corte esta chamada de rebolo. Este processo de corte proporciona à superfície da peça a exatidão das medidas desejadas (ZHANG *et al.*, 2018).

Segundo Dos Anjos (2016), a retificação é empregada quando a peça demanda altos níveis de qualidade geométrica, dimensionais e superficiais, nas etapas finais de fabricação da mesma. Diferentemente de outros processos de usinagem, como torneamento e fresamento, que apresentam ferramentas de corte com geometria definida, na retificação são utilizadas ferramentas de corte de geometria não definida, ou seja, os grãos abrasivos apresentam arestas de cortes irregulares. O que faz com que apresente menor compreensão na prática, por acreditarem que este processo é muito complexo, por apresentar multiplicidade de arestas cortantes e irregularidade na geometria, requerendo domínio dos parâmetros de velocidade de corte e de avanço, boa refrigeração e controle dimensional rigoroso.

A retificação é relatada como a usinagem final do produto com objetivo de se obter superfícies com baixa rugosidade e alta precisão dimensional, melhorando as superfícies de acabamento (NIE *et al.*, 2018). Com objetivo de redução de custos nos processos industriais de retificação e de atender as exigências em qualidade das peças, os processos de retificação conhecidos como *high performance grinding* (HPG), ampliaram os campos de aplicação, atendendo especialmente na indústria automotiva, de rolamentos e na indústria aeroespacial, abrangendo as operações tradicionais e as operações de alta precisão (KLOCKE *et al.*, 2016).

De acordo com Malkin e Guo (2008), o processo de retificação envolve uma grande quantidade de energia; uma parcela dessa energia é transformada em calor majoritariamente na região do corte, onde podem ser ocasionadas tensões residuais, trincas, dilatação térmica e divergências dimensionais. Sendo de grande relevância o uso do fluido refrigerante e lubrificante, para que o corte do material seja realizado de forma adequada, é preciso que o

fluido atinja a região do corte com volume suficiente para manter a temperatura em níveis adequados.

A retificação destaca-se devido ao elevado número de grãos abrasivos disponíveis para a realização de um processo, estes podem ser classificados como sintéticos ou naturais, e possuem diferentes características como: dureza, tenacidade e friabilidade (DINIZ *et al.*, 2014). A retificação é um dos processos de usinagem mais versáteis devido à capacidade de produzir peças com alta precisão geométrica e dimensional (OLIVEIRA *et al.*, 2011). Logo, a retificação se destaca como um processo muito importante, pois de maneira geral toda a peça que esta operação produz, já passou por outras etapas de usinagem, mas é de sua responsabilidade atingir a precisão dimensional do produto.

2.2. Elementos Básicos do Processo de Retificação

O processo de retificação é constituído por alguns elementos básicos: máquina retificadora, rebolo, peça, fluido de corte e atmosfera (MARINESCU *et al.*, 2016). Estes podem ser visualizados na Figura 1.

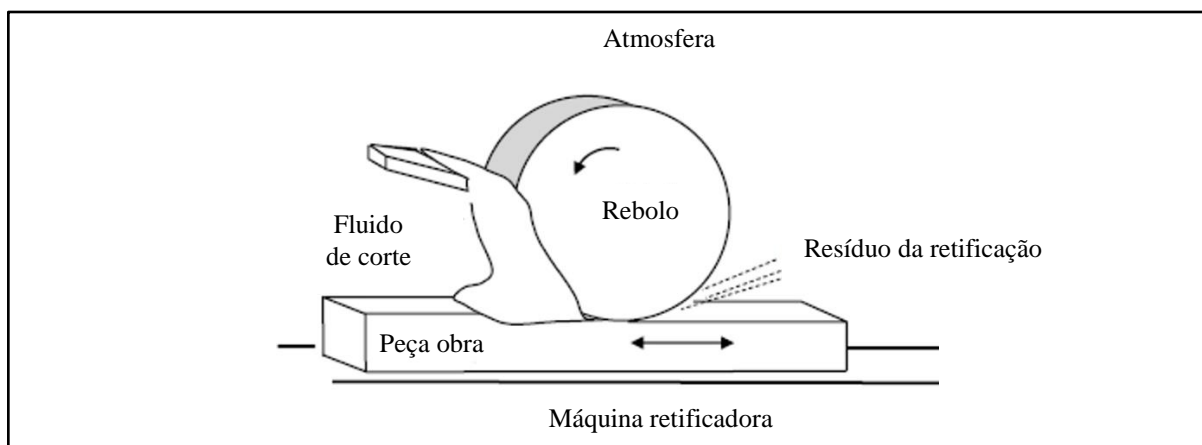


Figura 1 – Representação ilustrativa dos seis elementos básicos do processo de retificação.

Fonte: Adaptado de MARINESCU *et al.*, 2016.

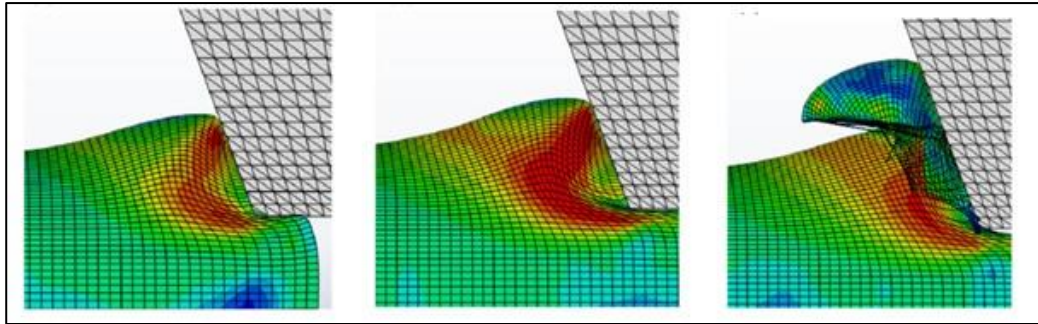
Estes elementos podem ser descritos da seguinte forma:

– Máquina retificadora: fornece as condições estáticas e dinâmicas que possibilitam o deslocamento e a interação entre o rebolo e a peça a ser trabalhada. Responsável pela precisão e estabilidade dimensional. Visto que esta última pode impactar em fraturas e desgastes dos grãos abrasivos (PATIL *et al.*, 2018; RESHETNIKOVA *et al.*, 2020);

- Rebolo: ferramenta de corte utilizada na máquina retificadora, cuja superfície é abrasiva. Constituído de grãos geralmente de óxido de alumínio ou de carbeto de silício. Realiza a remoção de material na peça durante a operação de corte (PICCILLI *et al.*, 2011; ROWE, 2014);
- Peça: pode ser de geometrias diversas, como superfícies planas, cilindros externos, furos, levemente esféricas, dentre outros. Devem ser produzidas sem que haja danos térmicos ou mecânicos e dentro das especificações definidas. Suas características dependem dos parâmetros de processo como material, forma, rigidez e propriedades químicas e térmicas (ROWE, 2014; RESHETNIKOVA *et al.*, 2020);
- Fluido de corte: responsável por lubrificar a região do corte, diminuir o atrito e o desgaste do rebolo, resfriar a peça reduzindo a temperatura na sua superfície para evitar danos térmicos (ROWE, 2014; RESHETNIKOVA *et al.*, 2020);
- Atmosfera: reduz o atrito na retificação dos materiais metálicos. Superfícies de materiais metálicos apresentam óxidos na superfície que auxiliam na lubrificação do processo (ROWE, 2014; RESHETNIKOVA *et al.*, 2020);

2.3. Formação de Cavaco

O processo abrasivo remove quantidades pequenas de material, produzindo cavacos muito pequenos (décimos ou centésimos de milímetros), devido à interação entre o rebolo e a peça a ser usinada. O cavaco é formado por cisalhamento no processo de retificação devido às condições físicas empregadas, dependendo dos parâmetros de corte que afetam a temperatura, as tensões, forças, e potências (DAI *et al.*, 2015). Na Figura 2 é representada a formação do cavaco.



a) corte da ferramenta b) geração de picos c) formação do cavaco.

Figura 2 – Representação das etapas da formação de cavaco.

Fonte: Adaptado de DAI *et al.*, 2015.

a) Início do corte: inicialmente uma deformação elástica pode ser observada na região do corte, quando os materiais da peça tendem a sofrerem deformação sob efeito do processo de atrito e de altas temperaturas, sendo necessário conhecer a tensão de escoamento do material da peça (DAI *et al.*, 2015);

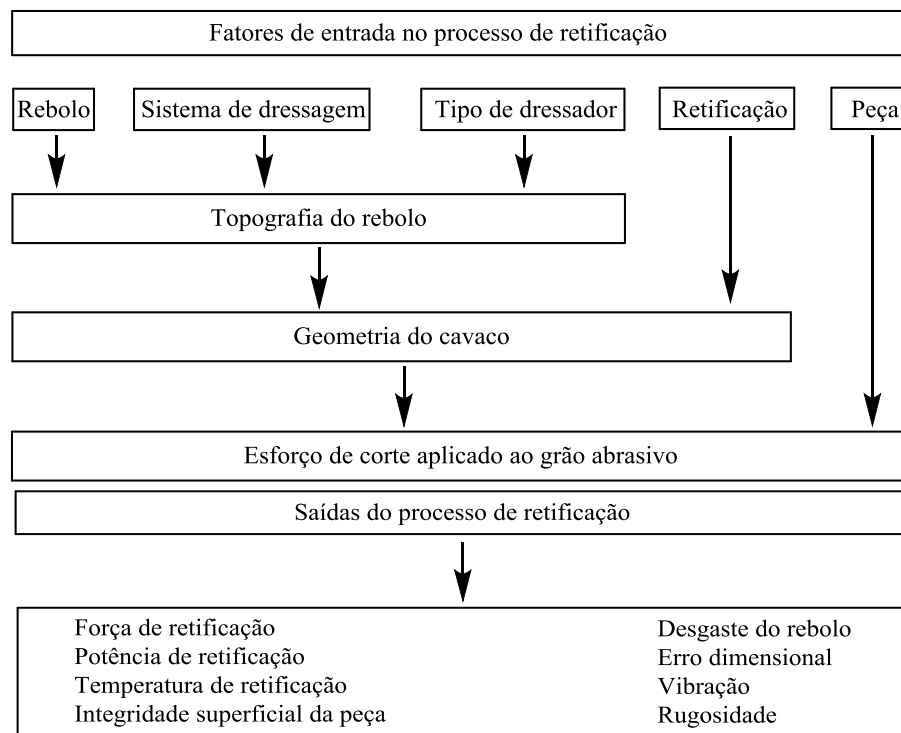
b) Geração de picos: além da fase de deformação elástica, também ocorre a fase de deformação plástica, e o material escoar em forma de rebarba, podendo ser vista uma deformação de cisalhamento. Os grãos abrasivos do rebolo continuam o processo de penetração na peça e a deformação plástica continua ocorrendo (DAI *et al.*, 2015);

c) Formação do cavaco: nesta etapa ocorre a formação do cavaco e a região de escoamento plástico se dobra e corre a área de contato cavaco-grão. Estes consomem a energia fornecida pelo sistema, após atingir o valor de penetração máxima e pressão crítica de trabalho (DAI *et al.*, 2015).

O cavaco removido da peça se aloja nos poros do rebolo com tendência ao entupimento. A força centrífuga gerada devido à rotação do rebolo com aumento da velocidade e o fluido refrigerante gera uma redução da espessura do cavaco, expulsando o mesmo. Caso esse material não seja expulso, ocorre o empastamento dos poros do rebolo, fazendo-se necessário aumentar a frequência de dressagem, e concomitantemente ocorre o aumento dos custos do processo. A extensão de cada etapa deste processo pode variar de acordo com os parâmetros de usinagem aplicados, como por exemplo, a velocidade de corte, velocidade de avanço e agressividade dos grãos abrasivos (TAWAKOLI; BARRETT, 1993; SHIH *et al.*, 1999).

2.4. Parametrização do processo de retificação

São relatados na literatura quatro processos de retificação: plana periférica, plana facial, cilíndrica periférica e cilíndrica facial. De um modo geral, pode-se afirmar que no processo de retificação ocorre o movimento da ferramenta (rebolo) e movimento da peça. Em alguns processos específicos existe a necessidade do movimento longitudinal da peça (DINIZ *et al.*, 2014; MARINESCU *et al.*, 2016). No planejamento do processo de retificação é importante definir as entradas e saídas do processo, assim como as interações do processo geradas entre o rebolo e a peça a ser usinada (KING; HAHN, 1986). Conforme representado no Esquema 1.



Esquema 1 – Características de entrada e saída do processo de retificação.

Fonte: Adaptado de CHEN; ROWE, 1996.

O domínio dos processos requer conhecimento de parâmetros de retificação, que estão diretamente ligados à vida do rebolo, a qualidade do produto, o tempo de ciclo e a melhoria contínua do processo, sendo esses (MARINESCU *et al.*, 2016):

- Velocidade de corte ou velocidade tangencial do rebolo (V_c);
- Velocidade tangencial da peça (V_w);
- Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço do rebolo (V_f);
- Profundidade real de corte (a_e);
- Comprimento do arco de contato (L_g);
- Taxa de remoção de material (Q).

2.4.1. Velocidade de corte ou velocidade tangencial do rebolo (V_c)

Na retificação cilíndrica o sentido de rotação do rebolo e da peça são opostos. A velocidade de corte (V_c) do processo pode ser entendida como sendo a soma da velocidade periférica da peça mais a velocidade do rebolo. Na retificação plana, V_c é a soma da velocidade periférica do rebolo mais a velocidade de avanço da peça, como é mostrado na Figura 3 (DOS ANJOS, 2016; GASAGARA *et al.*, 2020).

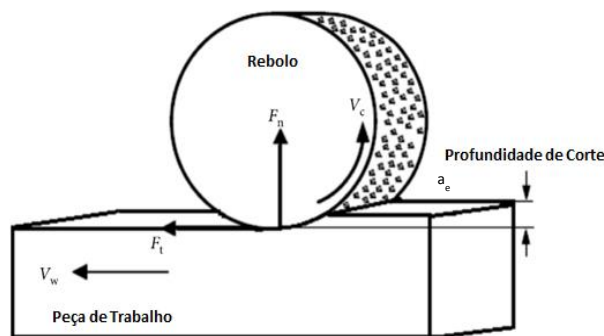


Figura 3 – Retificação cilíndrica.
Fonte: Adaptado de GASAGARA *et al.*, 2020..

A velocidade é determinada em metros por segundos [m/s] e, definida de acordo com a Equação 1, na qual V_c é a velocidade de corte ou velocidade tangencial do rebolo; d_c é o diâmetro do rebolo [mm] e n_c é a rotação do rebolo [rpm] (GRAF, 2004).

$$V_c = \frac{\pi \cdot d_c \cdot n_c}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

A velocidade de corte (V_c) influencia diretamente o comportamento do rebolo. O aumento da velocidade proporciona a redução do esforço de corte e, concomitantemente o rebolo tem um aumento em sua vida, por reagir de forma mais dura, resultando em um acabamento superficial de melhor qualidade (DINIZ *et al.*, 2014).

2.4.2. Velocidade tangencial da peça (V_w)

A velocidade tangencial da peça (V_w) ou simplesmente velocidade da peça é calculada em função de sua rotação e seu diâmetro. É definida conforme Equação 2 (DOS ANJOS, 2016).

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (2)$$

Sendo V_w a velocidade tangencial da peça [m/s]; d_w é o diâmetro da peça [mm] e n_w a rotação da peça [rpm].

2.4.3. Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço de usinagem (V_f)

A velocidade de mergulho ou velocidade de avanço (V_f) é aquela na direção do movimento de avanço. Esta velocidade influencia diretamente no acabamento da peça, na força de corte e no seu desgaste. Esse parâmetro é de extrema importância para o dimensionamento do processo em que a potência da máquina deve ser condizente com a força de corte aplicada. A escolha do valor desta velocidade impacta no acabamento da peça usinada, sendo que, quanto maior este parâmetro maior a rugosidade. A velocidade de avanço está diretamente relacionada com a produtividade, e é consideravelmente menor que a velocidade de corte, ficando esta variável limitada até valores que não proporcione danos na peça (ALVES, 2005; ROWE, 2014).

A velocidade de avanço (mergulho) determina a taxa de remoção volumétrica do material a ser processado. Quanto maiores as velocidades de avanço maiores são as forças de corte, sendo necessárias máquinas mais robustas. Contudo, estas maiores velocidades possibilitam menores tempos de usinagem e ganho na produtividade (NGUYEN; ZHANG, 2003).

2.4.4. Profundidade real de corte (a_e)

A profundidade real de corte programada no processo é definida pela Equação 3, que considera o deslocamento de avanço do rebolo em uma única revolução completa da peça usinada (ROWE, 2014).

$$a_e = \frac{\pi \cdot d_w \cdot V_f}{V_w} \quad (3)$$

Na equação acima a_e indica a profundidade de corte [mm]; d_w é igual ao diâmetro da peça [mm]; V_w é igual à velocidade tangencial da peça [mm/min] e V_f é igual à velocidade de mergulho [mm/min].

A profundidade real de corte é a dimensão que a ferramenta penetra na peça (STEMMER, 2007); geralmente é menor do que a programada ou calculada no início do processo, devido a deformações dos componentes da máquina, do rebolo e da peça. Após o início do avanço, a profundidade real costuma se aproximar do valor teórico, pois as deformações já ocorreram e o processo é estabilizado (NGUYEN; ZHANG, 2003; STEMMER, 2007).

2.4.5. Comprimento do arco de contato (L_g)

O comprimento do arco de contato (L_g) é definido pelo comprimento de contato geométrico, desconsiderando as deformações elásticas dos elementos do processo, e é definido pela Equação 4 (MARINESCU *et al.*, 2016).

$$L_g = \sqrt{a_e \cdot d_{eq}} \quad (4)$$

Na equação L_g é igual ao comprimento do arco de contato [mm]; a_e é igual a profundidade de corte [mm] e d_{eq} é o valor do diâmetro equivalente [mm]. No qual o diâmetro equivalente é o método de cálculo responsável por representar o comprimento do arco de contato independentemente do processo de retificação (MARINESCU *et al.*, 2016; NIE *et al.*, 2018).

2.4.6. Taxa de remoção de material (Q)

A taxa de remoção de material é produto da profundidade de corte pela velocidade de peça de trabalho pela largura de contato entre peça rebolo, conforme definida pela Equação 5 (ROWE, 2014).

$$Q = a_e \cdot V_w \cdot b \quad (5)$$

Sendo inicialmente utilizada a Equação 3 supracitada no item 2.4.4 para definição da profundidade de corte a_e [mm]; Q é referente a taxa de remoção de material [mm³/s]; V_w é igual a velocidade da peça [m/s] e b é igual a largura de contato entre peça rebolo [mm].

Em geral os processos que geram maior taxa de remoção de material, envolvendo maior energia, tendem a afetar mais a integridade de superfície. Segundo Rowe (2014), a taxa de remoção de material específica (Q') pode ser definida como a taxa de remoção de material (Q) por unidade de largura de contato (b), pois a energia por volume de cavaco removido, forças e potência de corte, são diretamente proporcionais à largura de contato, conforme representada na Equação 6.

$$Q' = a_e \cdot V_w = \pi \cdot d_w \cdot V_f \quad (6)$$

2.5. Rebolos

O rebolo é uma ferramenta composta por um ligante que pode ser de resínóide (fabricado à base de resina), vitrificado ou metálico. Utilizado no processo de retificação de peças é uma ferramenta que une inúmeros grãos abrasivos numa geometria circular, distribuídos de maneira aleatória, de forma a apresentarem arestas cortantes. Sua estrutura deve apresentar certa porosidade para o escoamento do cavaco e retenção do fluido de corte. O tipo de rebolo selecionado e como usá-lo afeta a sua vida, a taxa de remoção do material e o acabamento da superfície da peça. Na Figura 4 são representados alguns tipos de rebolos aplicados no processo de retificação (DINIZ *et al.*, 2014; TORRES *et al.*, 2019).



Figura 4 – Rebolos.

Fonte: Grinding Wheel, Abrasiveflex, 2022. Disponível em: <<https://abrasiflex.com.au/product/grinding-wheels/>>, acesso em: 06.03.2022.

A liga resinóide é indicada para operações *roll grinding*, *disc grinding*, *centerless*, pendular, pedestal e manual. A liga vitrificada é indicada para retificadoras cilíndricas de virabrequim, de eixo de comando, de centerless, internas, de plana e de rosca. As ligas metálicas são especificadas quando se exige a manutenção de perfis agudos e, principalmente, quando se trabalha com materiais agressivos como vidro e pedra (PICCILLI *et al.*, 2011; PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as características de um rebolo devem ser adequadas para atingir o desempenho esperado durante a sua aplicação no processo de retificação. Segundo a norma ABNT NBR 15230 o rebolo é classificado e padronizado de acordo com os seguintes itens:

- Tipo de grãos;
- Tamanho dos grãos;
- Dureza do rebolo;
- Estrutura do rebolo;
- Tipo de Ligante;
- Descrição do rebolo;
- Mecanismo de desgaste do rebolo.

2.5.1. Tipo de grão

Nos rebolos podem-se encontrar diferentes tipos de grão, com diferentes características. Os atributos mais importantes na seleção do tipo de grão abrasivo, tais como o tamanho, resistência à fratura e a estabilidade térmica do grão, têm sido reconhecidos como regras básicas na seleção do grão para uma determinada aplicação. Os grãos mais utilizados são de óxido de alumínio, carbeto de silício (SiC), CBN, e diamante (DINIZ *et al.*, 2014; DOS ANJOS, 2016; RESHETNIKOVA *et al.*, 2020).

Os grãos de óxido de alumínio comum (tipo A) são compostos de 96 a 97% de Al_2O_3 cristalizado e 2000 Knoop de dureza. São amplamente utilizados na usinagem de aço carbono, aço rápido e outros materiais com resistência à tração elevada, como ferro fundido cinzento e nodular. Existem variedades desse tipo de grão, como óxido de alumínio branco, rosa e etc. Cada um deles recebe diferentes elementos de liga durante sua fabricação e passa por diferentes processos, resultando em diferentes durezas e comportamentos durante a usinagem, como por exemplo, maior vida e maior capacidade de remoção de material por passe (LEONESIO *et al.*, 2018; GASAGARA *et al.*, 2020).

Os grãos de CBN oferecem elevada resistência ao desgaste e vantagens em relação à transferência de calor no processo de retificação, transmitindo três vezes menos calor que o óxido de alumínio, e conseqüentemente redução da incidência de danos térmicos e de tensões residuais na peça usinada. É principalmente utilizado na usinagem de aços endurecidos e aço liga. O CBN é o segundo material mais duro existente, com dureza mais baixa do que o diamante. E apresenta dureza duas vezes maior que a do óxido de alumínio. Além de apresentarem maior resistência de ligação e uniformidade dos grãos, possibilitando maiores profundidades de corte (MAITY e CHAKRABORTY, 2013; YU *et al.*, 2017).

Os grãos abrasivos de carbeto de silício (SiC) são resultados de uma mistura de 60% de areia sílica e 40% de coque de petróleo. As matérias-primas são fundidas em fornos elétricos sob temperatura de 2400 °C por aproximadamente 36 horas, gerando os grãos de carbeto de silício. Os grãos obtidos possuem alta dureza, entre 2500 a 2800 HV (Dureza Vickers). São bastante friáveis e sua coloração varia de verde ao preto, de acordo com o nível de pureza (DAI *et al.*, 2015).

O SiC verde é o tipo mais puro do carбето, contendo aproximadamente 99% de pureza. São identificados pela letra GC, apresentam estrutura cristalina mais refinada que os carбетos de silício preto e são mais friáveis. Em contrapartida possuem limitações de aplicação devido à característica de reagir quimicamente com materiais que possuem afinidade com o carbono em temperaturas superiores a 750 °C, como por exemplo, o níquel e o ferro. Estes possuem grande aplicabilidade para usinagem de tungstênio (metal duro), vidro e cerâmica (PEI *et al.*, 2003; DINIZ *et al.*, 2014).

O carбето de silício em sua coloração preta apresenta um grau de pureza de aproximadamente 97%, esta coloração é devido ao teor de carbono livre em sua estrutura. Estes são identificados pela letra C e possui tenacidade maior que os grãos de carбето de silício verde. Possuem grande aplicabilidade na usinagem de materiais como ferro fundido, bronze, cobre, alumínio, aços com alto teor de cromo e aço nitretados (PEI *et al.*, 2003; DINIZ *et al.*, 2014).

O diamante é um dos materiais com maior dureza conhecido na literatura podendo ser encontrado na forma natural ou sintético. O natural pode atingir as maiores durezas, entretanto, os sintéticos são mais utilizados na retificação devido à dificuldade de avaliar o material na sua forma natural, principalmente em relação às tensões internas do grão. Os grãos abrasivos de diamante podem ser aplicados para materiais não ferrosos, uma vez que na usinagem de materiais ferrosos há uma redução de desempenho, devido a erosões químicas geradas pela temperatura do processo, podendo ocasionar perdas da afiação das arestas e um aumento do atrito entre o rebolo e a peça (LEONESIO *et al.*, 2018; MARINESCU *et al.*, 2016).

2.5.2. Tamanho de grão

O tamanho do grão é representado por um número correspondente ao número de malhas por polegada linear de uma peneira de classificação conhecida como escala *mesh* e padronizado por órgãos internacionais como por exemplo FEPA, ISO, ANSI e JIS.

Segundo Buj-Corral *et al.* (2019) o tamanho dos grãos abrasivos impacta diretamente na taxa de remoção de material, na rugosidade e no desgaste do rebolo. Esses parâmetros têm tendência de aumentarem quanto maior o tamanho do grão e densidade do abrasivo. Por outro lado, quando a alta densidade é combinada com grãos pequenos ou médios, a rugosidade e a taxa de remoção de material diminuem.

Alguns fabricantes de rebolo às vezes adicionam um único dígito após o número *mesh* para indicar se o rebolo contém uma mistura de tamanhos de grão. O número 1 após o número do tamanho de grão geralmente indica que o rebolo contém grãos abrasivos apenas do número de grão indicado, enquanto um número diferente designaria uma mistura particular de tamanhos de grão (MALKIN; GUO, 2008).

Normalmente separam-se os grãos de diferentes faixas de tamanho através de peneiras, classificadas de acordo com a quantidade de fios por polegada da malha da mesma, de forma que, quanto maior o número da malha, menor o grão que é capaz de atravessá-la. Na Tabela 1 é apresentado a classificação da federação europeia (FEPA) para tamanho de grão.

Tabela 1 - Diâmetro médio de grãos abrasivos de acordo com a classificação FEPA.

FEPA F Grain	Diâmetro médio de grão (μm)	FEPA F Grain	Diâmetro médio de grão (μm)
F5	4125	F90	154
F6	3460	F100	129
F7	2900	F120	109
F8	2460	F150	82
F10	2085	F180	69
F12	1765	F220	58
F14	1470	F230	53 \pm 3
F16	1230	F240	44.5 \pm 2
FEPA F Grain	Diâmetro médio de grão (μm)	FEPA F Grain	Diâmetro médio de grão (μm)
F20	1040	F280	36.5 \pm 1.5
F22	885	F320	29.2 \pm 1.5
F24	745	F360	22.8 \pm 1.5
F30	625	F400	17.3 \pm 1
F36	525	F500	12.8 \pm 1
F40	438	F600	9.3 \pm 1
F46	370	F800	6.5 \pm 1
F54	310	F1000	4.5 \pm 0.8
F60	260	F1200	3.0 \pm 0.5
F70	218	F1500	2.0 \pm 0.4
F80	185	F2000	1.2 \pm 0.3

Fonte: FEPA-Standard 42-2:2006

2.5.3. Dureza do rebolo

A dureza também conhecida como grau do rebolo é uma característica referente à dificuldade de se remover os grãos abrasivos da face de trabalho do rebolo. Malkin e Guo (2008), definiu o grau do rebolo como a resistência à tração para arrancar os grãos do aglomerante empregado. Rowe (2014) publicou que o grau de dureza é um indicativo do desgaste do rebolo. A dureza de uma ferramenta abrasiva é o grau de coesão entre os grãos e o aglomerante utilizado (DINIZ *et al.*, 2014).

Os rebolos são classificados de acordo com a dureza, podendo ser extremamente macio, muito macio, macios, médios, duros, muito duros ou extremamente duros, de acordo com a classificação da ABNT NBR 8800 de 2008 mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação quanto à dureza de rebolos.

Extremamente macios	Muito macios	Macios	Dureza média	Duros	Muito duros	Extremamente duros
A	E	H	L	P	T	X
B	F	I	M	Q	U	Y
C	G	J	N	R	V	Z
D		K	O	S	W	

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 8800, 2008. Disponível em: <https://engcivil20142.files.wordpress.com/2018/03/nbr8800_2008_1.pdf>, acesso em: 06.03.22.

Um ligante com alta resistência ao desgaste dificulta o desprendimento dos grãos abrasivos, propiciando o desgaste dos mesmos e ocasionando a perda do corte. Esse fenômeno piora as condições de usinagem, aumentando o esforço de corte e o calor gerado, com consequente queima na peça usinada (PATIL *et al.*, 2018; BARÉNYI *et al.*, 2019).

Geralmente materiais mais duros, como aço rápido e aços temperados são usinados com rebolos mais moles, no qual a autofiação do rebolo acontece devido ao desprendimento dos grãos da superfície. Os rebolos mais duros são empregados em obras diversas de aços mais moles, como em aço carbono, no esmerilamento manual, afiação, retificação de cantos, corte e rebarbação. Quanto mais duro for o material a retificar, mais macio deve ser o rebolo e vice-versa (PATIL *et al.*, 2018; BARÉNYI *et al.*, 2019).

2.5.4. Estrutura do rebolo

A estrutura de um rebolo geralmente é classificada como fechada, média ou aberta, de acordo com a concentração em volume de grãos abrasivos. Quanto maior a concentração de grãos mais fechada será a estrutura e menor o número de poros, uma estrutura mais fechada promove um melhor acabamento da peça usinada (DINIZ *et al.*, 2014). Na Figura 5 é ilustrado dois tipos de estruturas de rebolo: um de estrutura aberta, nada mais é do que um maior espaçamento entre os grãos abrasivos e outro de estrutura fechada com menor espaçamento entre os mesmos.

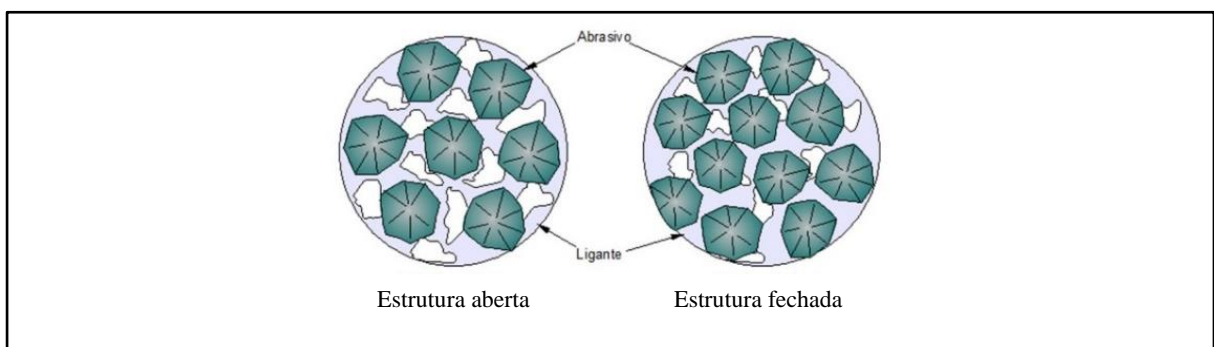


Figura 5 - Tipo de estruturas de rebolos.
Fonte: Marinescu *et al.*, 2016.

A estrutura do rebolo pode ser classificada numa escala de 0 a 14, de acordo com a concentração de abrasivo, onde: de 1 a 4 é considerada estrutura fechada; de 5 a 7 – estrutura média; de 8 a 12 – estrutura aberta e acima de 12 - poucos grãos abrasivos. Esses valores podem variar de acordo com o fabricante (MARINESCU *et al.*, 2016).

No processo de retificação o ideal é um equilíbrio entre a quantidade de grãos, que permite uma melhor remoção de material da peça, a abertura da estrutura, que o fluido de corte atinja a região desejada e o cavaco seja escoado (MALKIN; GUO, 2008).

2.5.5. Tipo de Ligante

A liga aglutinante, chamada simplesmente de ligante, está entre um dos componentes básicos na construção de um rebolo. Tem como função principal garantir a fixação dos grãos abrasivos ao rebolo mantendo o poder de corte durante o processo. O ligante utilizado deve resistir à interação dos componentes químicos do fluido de refrigeração, assim como resistir a

altas rotações a que o rebolo é empregado no processo de retificação. Além de exercer a função de renovação dos grãos abrasivos, ou seja, deve permitir que a determinada pressão de corte ocorra o desprendimento dos grãos abrasivos superficiais, para que os novos grãos entrem em ação (PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014; PATIL *et al.*, 2018).

Existem vários tipos de ligante e sua escolha deve estar alinhada ao tipo de processo que será empregado, no ramo da indústria metal mecânica os principais aglomerantes aplicados na construção de rebolos são vitrificado, resinóide e metálico. Contudo, existem outros tipos, como os ligantes de borracha e de elástico (MALKIN; GUO, 2008).

Os ligantes vitrificados são compostos de materiais naturais como argila, quartzo e feldspato. Estes elementos são combinados quimicamente e em seguida são submetidos a altas temperaturas (até 1250 °C), gerando um ligante de estrutura rígida, ou seja, vitrificada, porém com grande fragilidade a impactos e a grandes pressões de trabalho. Nas retificações de precisão, os ligantes vitrificados são utilizados em cerca de 50% dos rebolos convencionais (MALKIN; GUO, 2008).

No rebolo o ligante vitrificado é identificado pela letra “V” e permite trabalhos de precisão, uma vez que sua rigidez permite manter a estabilidade do perfil do rebolo. Possui maior dureza do que os ligantes de resinoide, em contra partida, apresentam custos mais elevados. Este tipo de liga pode ser aplicado à velocidade de corte de até 60 m/s e permanecem estável em trabalhos com utilização de fluidos como água, óleos e ácidos (NADOLNY, 2015).

As ligas de resinoides são compostas de materiais orgânicos, que são prensados a quente e resultam em uma estrutura com elevada resiliência e resistência mecânica. No rebolo este ligante é identificado pela letra “B”. Um ponto importante deste tipo de ligante é a possibilidade da perda da capacidade de fixação dos grãos abrasivos quando expostos a trabalhos com temperaturas superiores a 250 °C. Este é o segundo tipo de ligante mais aplicado em rebolos, podendo trabalhar em retificações com velocidade de corte de até 100 m/s (DINIZ *et al.*, 2014).

Os ligantes metálicos são constituídos de metais, como por exemplo, podem ser de níquel, cobalto, tungstênio e bronze. Os metais podem ser introduzidos nos rebolos por meio dos processos de metalurgia do pó, como o bronze e outros metais nobres ou pelo processo de eletrodeposição, como o níquel. Este tipo de liga possui maior resistência para se trabalhar com altas velocidades de corte, acima de 100 m/s (ZHOU *et al.*, 2020).

Durante a escolha do ligante alguns aspectos importantes devem ser levados em consideração, entre eles: as dimensões do rebolo, as condições de usinagem e a relação entre custo e benefício. Outro ponto importante é o coeficiente de dilatação térmica do grão abrasivo e da liga aglutinante, ambos devem ser semelhantes para evitar tensões residuais internas durante o processo à altas temperaturas de trabalho. Para facilitar o escoamento e/ou saída dos cavacos o ligante deve conter uma quantidade suficiente de poros em sua estrutura (PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014; PATIL *et al.*, 2018).

Os rebolos que são revestidos pelo processo de eletrodeposição utilizam um corpo metálico de aço revestido com grãos de CBN ou diamante sobre uma camada superficial do ligante. A espessura da camada fixa do ligante deve ser de no mínimo 50% do valor da altura dos grãos, com intuito de garantir uma boa fixação dos mesmos. No processo de sinterização, a fixação dos grãos ocorre a uma temperatura acima de 1000 °C, o que pode reduzir e deformar o corpo metálico de aço (MARINESCU *et al.*, 2016).

2.5.6. Descrição do Rebolo

Cada rebolo deve conter suas especificações para identificação como suas dimensões e características. São diferenciados através de códigos de letras, que permitem conhecer o tipo e tamanho de grão, dureza, estrutura e ligante, como mostrado na Figura 6.

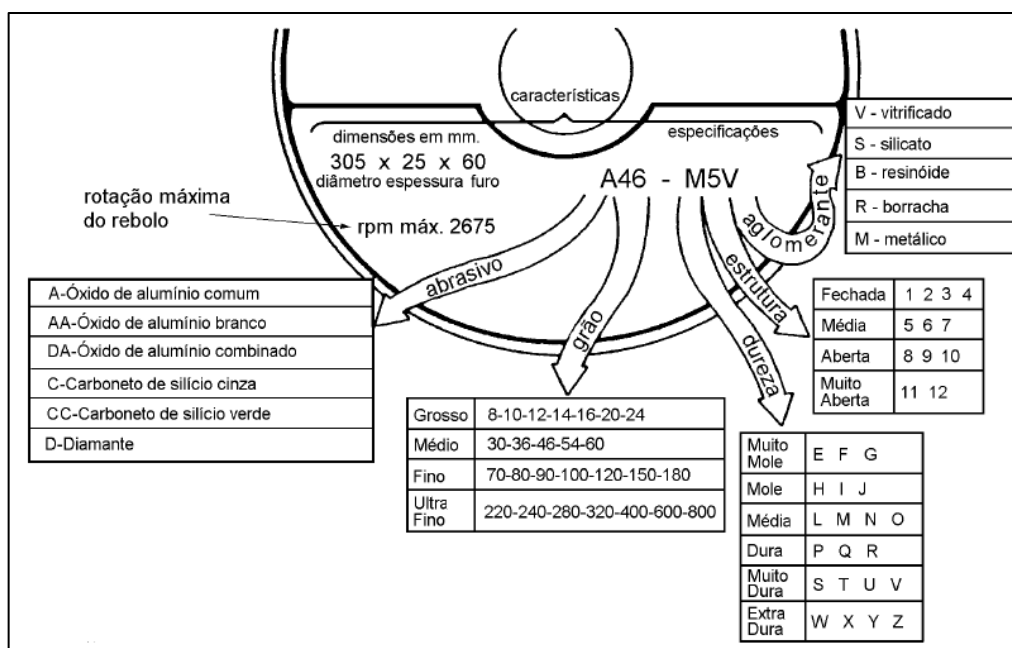


Figura 6 - Descrição de rebolos.

Fonte: Branca Flor Benke de Azevedo, 2017. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9902446-Reticificar-significa-corriger-irregularidades-de-superficies-de-pecas-assim-a-retificacao-tem-por-objetivo.html>>, acesso em: 10.03.2022.

2.5.7. Mecanismo de Desgaste do Rebolo

O processo de retificação é influenciado de maneira significativa pela topografia do rebolo. Conforme os grãos se desgastam, o rebolo vai perdendo suas características abrasivas e com isto torna-se necessário iniciar o ciclo de dressagem para corrigir esta superfície. Destaca-se três tipos de origem do desgaste de um rebolo, representados na Figura 7, onde: a) desgaste por atrito e/ou adesão; b) desgaste por fratura do grão e c) desgaste por fratura do ligante (MALKIN; GUO, 2008; KLOCKE *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2020).

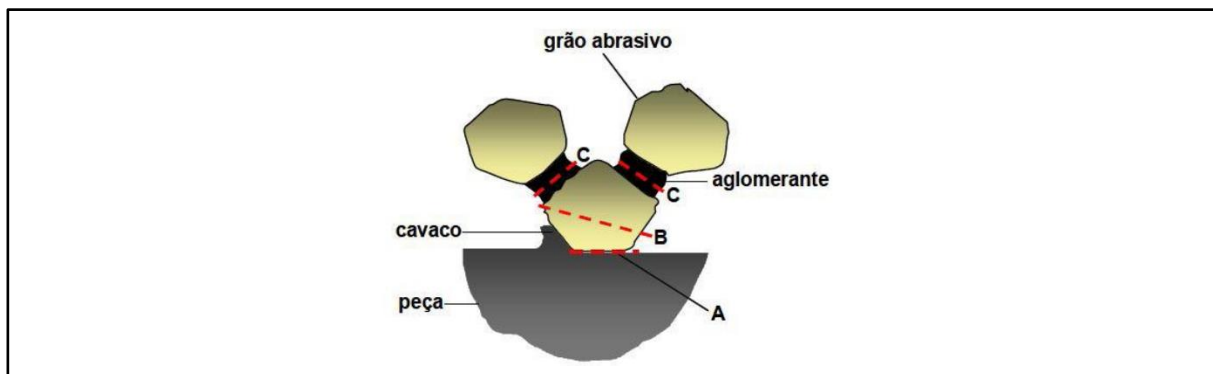


Figura 7 - Mecanismos de desgaste de rebolo.
Fonte: Malkin; Guo, 2008.

a) Desgaste por atrito e/ou adesão:

O desgaste por atrito ocorre por ações mecânicas e químicas, a partir da interação entre o grão abrasivo e o material que está sendo usinado, gerando um arredondamento das arestas dos grãos e o entupimento dos poros do rebolo. Conseqüentemente, causa a perda de corte do rebolo. Quando se analisa em termos dimensionais, este tipo de desgaste é insignificante, porém afeta o desempenho do rebolo durante a operação, podendo gerar queima da superfície da peça que está sendo usinada (MALKIN; GUO, 2008; PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014).

O desgaste de natureza química acontece quando o material do grão abrasivo é muito mais duro do que o do material usinado. No processo de interação do grão com a peça a altas temperaturas, reações químicas diversas ocorrem entre o grão abrasivo, a peça, o aglomerante, o fluido de corte e a atmosfera, como por exemplo, o diamante se degrada na presença de ferro (MALKIN; GUO, 2008).

b) Desgaste por fratura do grão:

O desgaste por fratura do grão ocorre devido à quebra dos grãos abrasivos que se desprendem do rebolo, onde micropartículas são desprendidas e liberadas, com isto, ocorre o processo de renovação das arestas dos grãos e o poder de corte do rebolo é mantido. Este fenômeno ocorre quando existe um grande esforço de corte aplicado, associado a característica de friabilidade dos grãos. Sendo importante mencionar que a superfície da peça pode ser comprometida, uma vez que existe uma perda significativa de material do rebolo devido a este tipo de desgaste. O desgaste por fratura do grão pode ocorrer devido a ações mecânicas e químicas, e é subdividido em macrofatura (ocorre por exemplo nos grãos de óxido de alumínio) e em microfatura (ocorre por exemplo nos grãos Seeded Gel e o Cubitron) (DINIZ *et al.*, 2014; LEONESIO *et al.*, 2018).

c) Desgaste por fratura do ligante:

Este tipo de desgaste ocorre devido a um determinado esforço de corte que causa o desprendimento do grão abrasivo, geralmente são mais intensos em rebolos com estruturas classificadas como mole, que não tem a capacidade de suportar muitos esforços. O grão com desgaste se desprende do rebolo e com isto libera espaço para que os novos possam entrar em atuação, para remoção de material do produto a ser usinado (DINIZ *et al.*, 2014; LEONESIO *et al.*, 2018).

2.6. Otimização de Processos

De acordo com Werkema e Aguiar (1996) A otimização de qualquer processo visa encontrar resultados que definem os melhores padrões de operação. Em grande parte dos casos, ao definir um experimento é preciso realizar modificações em variáveis controladas no processo. O objetivo é observar a resposta a cada alteração realizada e definir o trajeto para o qual o processo deverá seguir para atingir as melhorias definidas.

A escolha correta dos parâmetros nos processos de usinagem não apenas se torna uma questão de acompanhamento da evolução tecnológica, mas também uma exigência em razão da alta competitividade em relação a atender as necessidades de projeto atribuídas a um produto, bem como em relação à qualidade e o custo (PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014).

De acordo com Hillier e Lieberman (2006), para formular uma modelagem matemática, com decisões quantificáveis é necessário:

- Variáveis de decisão, (X_1, X_2, \dots, X_n) cujos valores devem ser determinados;
- Função objetivo, função matemática para medir o desempenho apropriado;
- Restrições, expressões matemáticas utilizadas para determinar uma limitação.

Na otimização dos processos são associadas ferramentas numérico-computacionais, com o objetivo de prever ou simular processos por meio da criação de modelos matemáticos. A modelagem matemática de diferentes processos é realizada por meio da elaboração de uma rotina de programação, por meio da utilização de *softwares* comerciais ou por meio de planejamento de experimentos (HASHEMI *et al.*, 2014; RESHETNIKOVA *et al.*, 2020).

A otimização de processos pode ter como objetivos minimizar os custos e maximizar a produtividade. E aborda-se um processo de otimização multiobjetivo em três etapas principais: modelagem das funções objetivo e suas restrições, definição da estratégia de combinação entre os objetivos fixados e a aplicação de um procedimento computacional para determinação do ponto ótimo (PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014).

Dentro deste contexto, tem-se também que a experimentação é parte fundamental dos modelos científicos, assim como aplicações de engenharia. Pode-se definir um experimento como um teste ou uma série de testes onde as variáveis de entrada do processo são alteradas de forma planejada e, após o processamento, o resultado é observado nas saídas do processo (PATTNAIK; JHA; KARUNAKAR, 2014; MONTGOMERY; RUNGER, 2016).

Ainda com Montgomery e Runger (2016) os projetos experimentais baseados em ferramentas estatísticas, como por exemplo, experimentos fatoriais, completos ou fracionados, e metodologia de superfície de resposta para processos de várias etapas, acabam se tornando muito complexo para indústrias de fabricação em série, devido as condições econômicas e o risco de se parar uma linha completa de manufatura.

Diversos projetos de experimentos são conduzidos por pesquisadores com intuito de encontrar particularidades nos processos e nos sistemas. De maneira planejada as variáveis de entrada dos experimentos são alteradas, com o intuito de observar os parâmetros nas variáveis de resposta do estudo. Os autores relatam também a importância dos experimentos para a área de engenharia no aspecto de definição de novos processos, de melhoria contínua e de otimização de processos de manufatura, com objetivo de se alcançar um processo cada vez mais robusto, minimizando a ação dos fatores incontroláveis denominados como ruídos (MONTGOMERY; RUNGER, 2016).

2.6.1. Projeto de Experimentos (DOE)

O processo de planejamento de experimentos define a maneira adequada para amostragem, coleta e análise de dados através de métodos experimentais (DOE - *design of experiments*) entregando respostas válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2013).

As técnicas de DOE são utilizadas objetivando melhorar as características de qualidade de produtos e processos, reduzir o número de experimentos e otimizar a utilização de recursos. Uma das vantagens da técnica é a possibilidade de se poder calcular o número mínimo de experimentos necessários, para que na análise das variáveis e resultados, as conclusões sejam satisfatórias, ou seja, com menor custo, menor tempo e também validar a significância estatística (KLEIJNEN, 2005).

O DOE pode ser considerado uma abordagem estatística onde o modelo engloba o planejamento da atividade, a gestão, a coleta, as análises e a interpretação dos dados; a fim de estabelecer o ponto ótimo para o processo, em relação a determinada resposta. Pode ser utilizado para diferentes situações, como na avaliação do efeito da possível interação de parâmetros de entrada na variável de resposta. Favorece a padronização dos processos de manufatura, redução de custos, minimiza desperdícios e garante resultados precisos (OGUNBIYI *et al.*, 2020).

Diferentes processos de manufatura têm adotado a estratégia de análise do DOE. O método abrange alguns modelos analíticos, como por exemplo, a metodologia de superfície de resposta, que consiste em realizar a modelagem de um determinado experimento. Com o objetivo de modelar saídas para os processos de manufatura é utilizado o método de superfície de resposta do DOE, que é composto por estatística e técnicas matemáticas que podem ser usadas para gerar modelos de uma função com múltiplas variáveis (TORRES *et al.*, 2019).

Diferentes segmentos industriais têm aplicado o DOE para auxiliar as análises investigativas de forma sistemática e analisar a influência das variáveis do processo. Existem várias abordagens estratégicas para a experimentação, ao qual podemos citar o arranjo fatorial, o arranjo de mistura, os arranjos ortogonais de Taguchi e a metodologia de superfície de resposta (PICCILLI *et al.*, 2011; ZHOU *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2018). As técnicas que são aplicadas no DOE tem como objetivo criar um planejamento para um experimento para analisar estatisticamente o processo e se espera obter respostas validas e objetivas. Pode-se dizer que esta ferramenta possui grande potencial de utilização em vários processos industriais, por permitir a detecção das interações das variáveis de entrada e analisar o efeito

destas interações nas variáveis de resposta, através de um modelo matemático (KLEIJNEN, 2005).

Os objetivos de um experimento são alcançados quando se segue o planejamento, analisando os resultados, detectando e documentando as anormalidades evidenciadas durante a condução do mesmo. Assim como analisar os efeitos dos fatores do modelo, de acordo com os métodos e ferramentas adequadas, para possibilitar a análise e interpretação dos dados e criar ações de correção ou melhoria do processo estudado (PICCILLI *et al.*, 2011; ZHOU *et al.*, 2016; OGUNBIYI *et al.*, 2020).

2.6.2. Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é baseada em um conjunto de técnicas matemáticas, que aliada às técnicas estatísticas permite a análise e a modelagem das repostas de um experimento, assim como a verificação da influência das variáveis. Os modelos matemáticos podem ter respostas lineares ou quadráticas para determinado experimento (BOX; DRAPER, 1987; DING; LIN; WEI, 2004).

A MSR tem como objetivo a otimização do processo, dividindo-se em duas fases: a modelagem e a busca por uma região de curvatura. A intenção é alcançar a região ótima do processo, podendo ser um ponto máximo ou mínimo na superfície de análise. A busca da região de curvatura sempre é realizada no sentido da máxima inclinação para o modelo determinado. Com as respostas observadas, o método avalia as relações existentes para um determinado processo e define quais parâmetros levarão ao alcance do ponto ótimo de otimização para uma resposta ou um conjunto (DING; LIN; WEI, 2004; MONTGOMERY, 2013).

É importante ter conhecimento do processo a otimizar, segundo Montgomery (2013), primeiramente deve-se encontrar uma aproximação do relacionamento entre a resposta (Y) e o conjunto de parâmetros, que são as variáveis (X). A análise da superfície é feita a partir de uma superfície ajustada, que será a análise da superfície real. A relação entre as variáveis dependentes e independentes geralmente é desconhecido, e é aplicado um polinômio de baixa ordem para qualquer região de interesse. Se a resposta for modelada por uma função linear, a função de aproximação é de primeira ordem, conforme a Equação 7.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 T_1 + \beta_2 C_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (7)$$

Têm-se também ajustes polinomiais de alto grau, para sistemas que apresentam curvaturas, ou seja, modelos de segunda ordem, conforme a Equação 8.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i T_i + \sum_{i=1}^k \beta_i C_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} T_i C_j + \varepsilon \quad (8)$$

O MSR vem sendo proposto como uma nova abordagem matemática para solução de alguns tipos de problemas nos processos industriais, mostrando os parâmetros mais significativos para a operação. Ao iniciar o planejamento experimental a partir desse método com *design* de central composto, o número de réplicas e amostragem são calculados com base estatística, de maneira a validar o grau de confiabilidade para o experimento, concomitante reduzindo as principais fontes de variabilidade dos dados coletados e atingindo a solução satisfatória para o problema em questão (BOX; DRAPER, 1987; PARODY *et al.*, 2018).

2.6.2.1. Arranjos Experimentais para Superfície de Resposta

Na coleta dos dados no método de superfície de resposta destacam-se dois arranjos experimentais: arranjo central composto (CCD - *Central Composite Design*) e *Box-Behnken* (DBB). O arranjo central composto é o mais utilizado e é constituído de uma matriz gerada por elementos experimentais distintos em três grupos, sendo:

- Fatorial completo ($2k$, sendo k o número de variáveis) ou fracionado ($2k-p$, sendo p a fração desejada do experimento);
- Conjunto de pontos centrais (m);
- Grupo de níveis extras ou pontos axiais ($2k$).

O CCD tem o objetivo de ajustar um modelo de segunda ordem, conforme ilustrado na Figura 8, se o módulo da distância entre o ponto central do arranjo e o ponto fatorial (+1, -1) for próximo de 1, a distância entre o ponto central e o ponto axial, representada por α , será maior que 1 e, depende de propriedades específicas de cada experimento e número de fatores envolvidos (BOX; DRAPPER, 1987; MONTGOMERY, 2013).

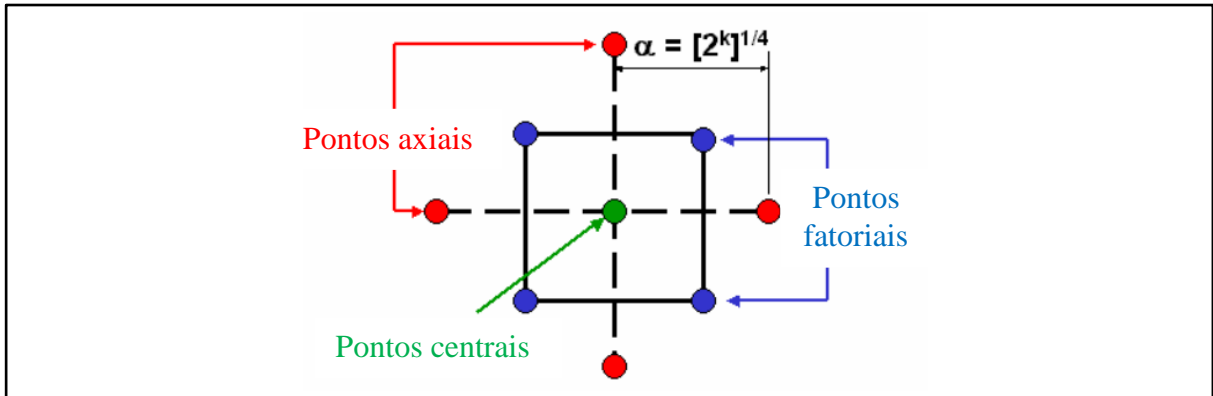


Figura 8 - Arranjo composto central.
Fonte: Adaptado de MONTGOMERY, 2013.

O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro da quantidade de fatores e representam os valores extremos de cada fator. De acordo com sua localização, o arranjo pode ser classificado como de face centrada (CCF), inscrito (CCI) ou circunscrito (CCC), conforme representado na Figura 9 e detalhado na Tabela 3. Por estes são representados a configuração de um CCD original e requerem cinco níveis para cada variável (MONTGOMERY, 2013; MYERS *et al.*, 2016).

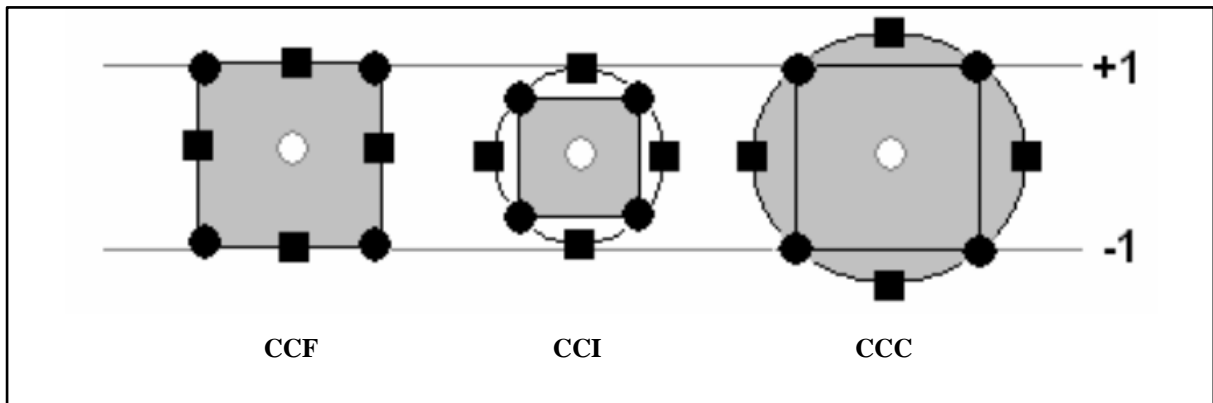


Figura 9 - Diferentes estruturas de arranjo composto central.
Fonte: NIST, 2004.

Tabela 3 - Tipos de arranjo de CCD.

Tipo de Arranjo	Descrição	Níveis por Fator
CCC	Basicamente é composto pelo CCD original, em outras palavras, os pontos axiais se localizam a uma distância α do ponto central.	Requer 5 níveis para cada fator
CCI	De forma geral são utilizados quando os limites de especificação não podem ser extrapolados por restrições do produto, do equipamento ou de segurança. Os pontos axiais se localizam a uma distância α de -1 a 1, e com isto cria-se um fatorial completo ou fracionado.	Requer 5 níveis para cada fator
CCF	É caracterizado pela disposição dos pontos axiais sobre o ponto central de cada face do espaço fatorial, podendo ser $\alpha = 1$ ou $\alpha = -1$.	Requer 3 níveis para cada fator.

Fonte: Adaptado de MONTGOMERY, 2013 e MYERS *et al.*, 2016.

O ponto central se repete com a finalidade de fornecer uma medida de erro puro, de forma a uniformizar a variância da resposta que se deseja otimizar, contudo para que isto ocorra, é necessário realizar repetições para cada ponto central. Nos casos em que α estiver próximo de \sqrt{k} (k se refere ao número de experimentos da porção fatorial do CCD) devem ser feitas de três a cinco repetições. Já nos casos em que α estiver próximo de 1, devem ser feitas uma a duas repetições ((BOX; DRAPPER, 1987; MYERS *et al.*, 2016).

2.6.3. *Desirability*

Em 1980, Derringer e Suich desenvolveram o método *desirability*, que tem grande aplicabilidade na indústria. Este método tem sido testado e usado em diversas aplicações com a finalidade de otimizar processos, possibilitado pela combinação de diferentes respostas do processo em uma única função de resposta, ou seja, conseguir converter as múltiplas variáveis respostas em uma única, combinando as respostas individuais em uma função composta, seguida por sua otimização (DERRINGER; SUICH, 1980; WU, 2005; LABIDI *et al.*, 2018).

O objetivo do método é a otimização individual dos parâmetros envolvidos, com a análise da variação dos seus comportamentos. Para isso, pode-se analisar os valores de *desirability* individual (d), para avaliar como os fatores de entrada otimizam uma resposta única, e *desirability* composta (D), para um conjunto de repostas. Por meio desses valores,

avalia-se o desempenho do processo, sendo que valores iguais ou próximos a 1 apresentam um bom desempenho (WU, 2005; OGUNBIYI *et al.*, 2020).

2.6.4. Gráfico de Pareto

O gráfico de Pareto é uma ferramenta de gestão, é um método simplificado e rápido de avaliação e definição dos parâmetros significativos do processo, utilizado para verificar os fatores de otimização. No método é gerada uma linha de referência que indica que os fatores que ultrapassam a linha possuem influência estatisticamente significativa sobre o processo analisado (KONIG, 1980; MAITY; CHAKRABORTY, 2013; ZHANG *et al.*, 2018). Na Figura 10, tem-se um exemplo de gráfico de pareto.

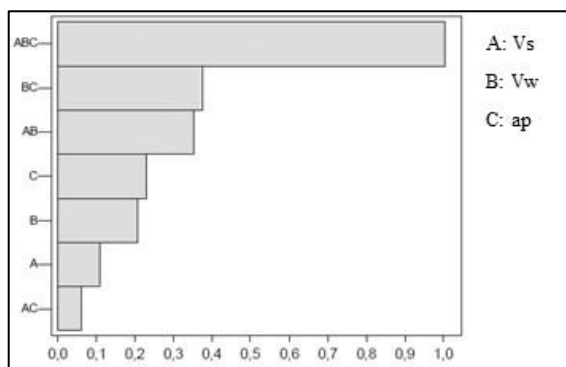


Figura 10 – Gráfico de pareto,
Fonte: KONIG, 1980.

2.7. Índices de Capacidade

Ferramentas estatísticas são frequentemente usadas para análise de tolerância. Segundo Mahshid e seu grupo de pesquisa (2018), com as evidências de simplicidade e eficácia as análises de capacidade do processo foram realizadas para representar a consistência do processo, ou seja, capacidade de fabricar produtos que estejam dentro dos limites de especificação. Essas medidas numéricas podem quantificar o potencial e o desempenho do processo usando métodos estatísticos adequados. O conceito de capacidade de processo foi usado para estimativa de desempenho de processo, expresso em porcentagem de itens não conformes e análise de sensibilidade para otimização de variáveis de processo.

A aplicação inicial do conceito de capacidade de processo surgiu com os trabalhos de Joseph M. Juran. A análise de capacidade mede a estabilidade do processo, utilizando como referência a especificação do produto, onde o principal objetivo é avaliar a faixa sobre o qual

o processo trabalha dentro dos limites de controle especificados. Esta ferramenta estatística auxilia no monitoramento da conformidade do produto no processo de manufatura e também a aderência aos requisitos estabelecidos pelo cliente (NIVRITHI *et al.*, 2013; MAHSHID *et al.*, 2018).

A avaliação qualitativa dos processos de fabricação, vem tornando-se mais difícil devido ao número de fatores que podem influenciar na qualidade do processo. Buscam-se novas metodologias com intuito de melhorar a resolução estruturada de problemas e as análises dos processos de manufatura, através da ferramenta de índices de capacidade (*Process Capability Indices - PCIs*). São quatro índices de capacidade normalmente utilizados, são números adimensionais que possibilitam uma quantificação do desempenho de processos com especificações unilaterais ou bilaterais, sendo estes: Cp, Cpk, Cpm e Cpmk (CHANG; WANG; CHEN, 2014; DELERYD, 1999; KLOCKE *et al.*, 2004).

A partir dos índices de capacidade, departamentos de produção podem investigar e melhorar as características de qualidade nos mais diversos segmentos da indústria. Nas últimas duas décadas, estatísticos e engenheiros de qualidade investigaram tais índices com o objetivo de aprimorar a avaliação do potencial dos processos e dos respectivos desempenhos. Em vista disso, foi proposta uma classe de índices de capacidade, dependendo de dois parâmetros não negativos, u e v , definidos na Equação 9 (GÜNAY *et al.*, 2019).

$$C_{p(u,v)}(\mu, \sigma) = \frac{d-u|\mu-T|}{3\sqrt{\sigma^2+v(\mu-T)^2}} \quad (9)$$

Sendo μ é a média do processo; σ é o desvio padrão; T é o *target*, ou valor alvo do processo e d é a metade do intervalo de especificação, definido pela Equação 10.

$$d = \frac{(LSE-LIE)}{2} \quad (10)$$

Sendo LSE é o limite superior de especificação; LIE é o limite inferior de especificação $u, v \geq 0$.

Quando se assume u e v iguais a zero, tem-se o índice Cp, conforme a Equação 11, esse índice mostra como está a dispersão do processo em relação a uma faixa de seis desvios padrões para cada lado a partir da média do processo (GÜNAY *et al.*, 2019).

$$C_{p(0,0)}(\mu, \sigma) = C_p = \frac{d}{3\sigma} = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} \quad (11)$$

Ao considerar u igual a 1 e v igual a 0, tem-se o índice Cpk, conforme Equação 12.

$$C_{p(1,0)}(\mu, \sigma) = C_{pk} = \frac{d-|\mu-T|}{3\sigma} \quad (12)$$

Ao considerar o valor alvo do processo (T) o centro dos limites de especificação, encontra-se a equação simplificada do índice Cpk (Equação 13). Segundo Günay *et al.* (2019), esse índice considera a dispersão do processo e a média, informando o quanto o processo está centralizado.

$$\text{Para } T = \frac{(LSE + LIE)}{2}, \text{ tem-se:}$$

$$C_{pk} = \text{mín} \left(\frac{LSE-\mu}{3\sigma}, \frac{\mu-LIE}{3\sigma} \right) \quad (13)$$

De forma geral, quanto maiores os índices Cp e Cpk melhor o processo em termos de variabilidade e taxa de defeitos. Para Günay *et al.* (2019), existem cinco condições em que um processo pode se encontrar, demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições de processo de acordo com os valores de Cp e Cpk.

Condição do Processo	Valores dos Índices
Inadequado	$C_p, C_{pk} < 1.00$
Capaz	$1.00 < C_p, C_{pk} < 1.33$
Satisfatório	$1.33 < C_p, C_{pk} < 1.50$
Excelente	$1.50 < C_p, C_{pk} < 2.00$
Super Capaz	$2.00 < C_p, C_{pk}$

Fonte: Günay *et al.*, 2019.

Ao considerar u igual a 0 e v igual a 1, tem-se o índice Cpm, conforme Equação 14. O índice Cpm demonstra em termos numéricos a condição de deslocamento dos dados em relação ao valor alvo do processo (CHANG; WANG; CHEN, 2014; DELERYD, 1999; KLOCKE *et al.*, 2004).

$$C_{p(0,1)}(\mu, \sigma) = C_{pm} = \frac{d}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (14)$$

Ao considerar u e v iguais a 1, tem-se o índice Cpmk, pela Equação 15.

$$C_{p(1,1)}(\mu, \sigma) = C_{pmk} = \frac{d - |\mu - T|}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (15)$$

Considerando o valor alvo do processo o centro dos limites de especificação, encontra-se a equação simplificada do índice Cpmk (Equação 16).

$$\text{Para } T = \frac{(LSE + LIE)}{2}, \text{ temos:}$$

$$C_{pmk} = \text{mín} \left(\frac{LSE - \mu}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}, \frac{\mu - LIE}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \right) \quad (16)$$

Uma classificação entre os quatro índices considera a sensibilidade de captar a distância entre a média do processo e o valor nominal de especificação, sendo o índice mais sensível o Cpmk, seguido pelo Cpm, Cpk e Cp (PEARN; CHEN, 1997). Além de processos e produtos, as análises de capacidade podem ser aplicadas para variáveis como tempo de espera e resultados de instrumentos de medições, para a maior parte dos processos e fenômenos, assume-se e verifica-se a normalidade dos dados (DELERYD, 1999; GÜNAY *et al.*, 2019).

2.8. Anéis de pistão

Os anéis de pistão são peças metálicas circulares auto expansivas, que proporcionam a vedação entre a câmara de combustão e o cárter, além de auxiliar na troca de calor do pistão para o cilindro e garantir o filme de óleo nas paredes do cilindro, principalmente em motores de combustão interna (MCI). Em compressores alternativos de ar, os anéis de pistão são utilizados para vedar a câmara de compressão. Geralmente são de ferro fundido cinzento ou nodular, de aço carbono ou inoxidável (MARATHE *et al.*, 2018).

Os anéis de pistão passam por várias operações em seu fluxo de processo produtivo, com objetivo de atender a sua forma final, conforme especificação de projeto. Dentre essas operações existem etapas de usinagem, tratamentos térmicos, revestimento e acabamento.

Além disto, existem as etapas de inspeção final visual e dimensional para assegurar a qualidade do produto. Vale ressaltar que o fluxo de processo de anéis de pistão se difere de acordo com a tecnologia do produto a ser fabricado (material, tipo de revestimento, especificações dimensionais e etc.) e, essas combinações resultam em centenas de fluxos diferentes (ARAUJO *et al.*, 2017; MARATHE *et al.*, 2018).

Em um pistão são encontrados diferentes tipos de anéis. O anel de primeiro canaleta é o anel mais próximo da câmara de combustão e, tem como principal finalidade evitar a passagem dos gases da combustão para o cárter, ocasionando um desgaste prematuro do canaleta do pistão e também do anel, fenômeno conhecido como *blow-by*. No segundo canaleta encontra-se o anel de compressão, também chamado de anel raspador, responsável por vedar os gases e por raspar o excesso de óleo da parede do cilindro. O anel de óleo, geralmente no terceiro canaleta, tem a finalidade de remover o lubrificante do cilindro no movimento de descida do pistão. Os anéis fazem a raspagem, a mola assegura a pressão dos anéis contra o cilindro, o óleo removido pelos anéis percorre dois caminhos até chegar ao cárter: os canais internos e também as laterais da saia do pistão (BRYSKIN *et al.*, 2013; ITO *et al.*, 2014). Estes anéis são representados na Figura 11.

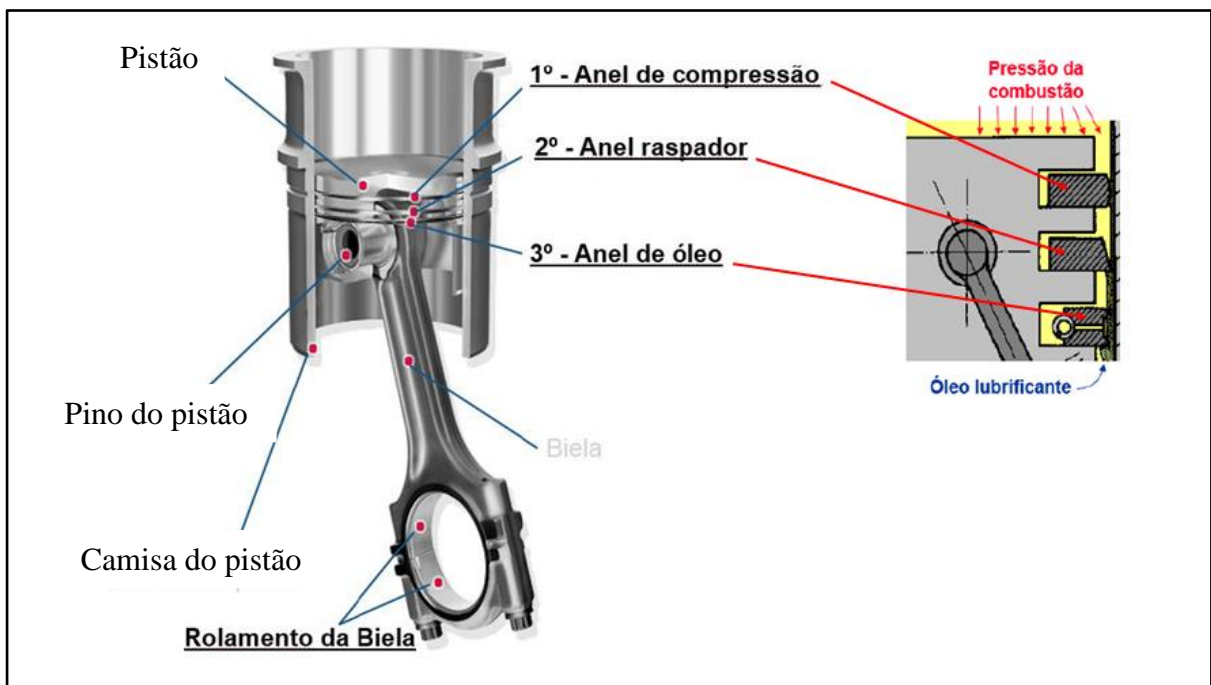


Figura 11 - Tipos de anéis no pistão.
Fonte: Adaptado de Dantas, 2015.

Os anéis de pistão possuem várias características, estas são definidas por diferentes nomenclaturas, que determinam as partes e dimensões dos anéis (Figura 12). Sendo denominados (DANTAS, 2015):

- Espessura radial: distância entre as faces externa e interna do anel;
- Altura: distância entre faces laterais do anel;
- Folga entre pontas: cota medida entre as extremidades do anel;
- Faces laterais: também chamada de “face superior” e “face inferior”, são as partes do anel que ficam em contato com as canaletas do pistão, paralela à cabeça do pistão;
- Face interna: parte do anel em contato com a canaleta do pistão;
- Face externa: também chamada de “face de contato”, é a parte do anel em contato com a parede da camisa do motor ou cilindro do motor;
- Diâmetro nominal: diâmetro externo do anel;
- Força tangencial: força que o anel exerce sobre a camisa do pistão ao expandir-se quando instalado num cilindro do motor;
- Conformidade: capacidade que um anel tem para se adaptar ao cilindro do motor;
- Cota *off-set*: diferença entre a face de trabalho inferior e superior;
- Cota *h55*: medida da face de trabalho inferior e superior;
- Circularidade: define-se pela distância radial mínima entre duas circunferências concêntricas que contêm o conjunto dos pontos do perfil analisado.

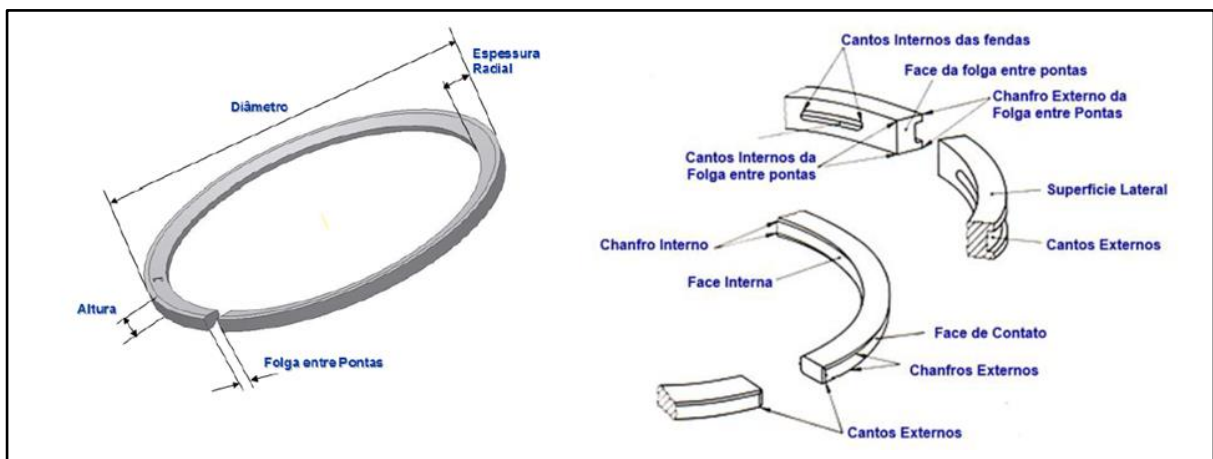


Figura 12 - Características e nomenclatura dos anéis.
Fonte: ISO 6621-5 2ed., 2005.

A conformabilidade é determinada pelo percentual de vedação do anel ao cilindro, quanto maior o coeficiente maior será a vedação. O cálculo do coeficiente de conformabilidade é diretamente proporcional à força tangencial e ao diâmetro nominal. Como

o diâmetro nominal é fixo para a configuração do motor a ser aplicado, a força tangencial torna-se a única variável. Quanto maior a força tangencial, maior o coeficiente de conformabilidade e maior a vedação, porém, o efeito colateral é que uma maior força tangencial gera um aumento de atrito, ocasionando um maior desgaste do conjunto (MARATHE *et al.*, 2018).

2.8.1. Tendências de inovação e desenvolvimento de anéis de pistão

Nos últimos anos as inovações e desenvolvimentos em motores de combustão modernos, estão voltados ao objetivo de redução de consumo de combustível. Do ponto de vista mecânico, uma série de desenvolvimentos tecnológicos implantados com sucesso, buscam a redução do atrito e resultam em motores mais eficientes, sendo assim, os anéis de pistão são amplamente empregados e estão recebendo revestimentos para resistir ao aumento da densidade de potência, da pressão de combustão e as variadas temperaturas (WÖLFLE *et al.*, 2016).

O anel de pistão contribui com 45% da perda de eficiência dos motores por atrito mecânico. Sendo assim, para reduzir o coeficiente de atrito, os anéis de pistão podem receber diversos tipos de revestimentos superficiais como: de cromo, molibdênio, nitreto de cromo ou por processo de deposição física de vapor (PVD), todos com a finalidade de alcançar robustez no aumento da vida útil do motor, baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste, estabilidade térmica e compatibilidade com os lubrificantes (LIN *et al.*, 2016; WÖLFLE *et al.*, 2016).

Nos últimos anos os fabricantes de motores têm optado pela utilização de revestimento de alta resistência ao desgaste, novos perfis geométricos nos conjuntos de anéis de pistão, aprimoramento do controle do filme de óleo e redução de atrito. A tecnologia de PVD é utilizada para a deposição de filmes metálicos finos sobre diversos tipos de substratos e, é indicado para produtos inovadores e de qualidade que atendam elevados padrões (resistência a abrasão, ao risco, a corrosão e dureza superficial) (BERGADO *et al.*, 2020; FU; CHAI, 2020).

O principal revestimento protetor que é aplicado aos anéis de pistão de motores a gasolina e a diesel é o nitreto de cromo (CrN), devido aos resultados eficientes relacionados a resistência ao desgaste, redução do coeficiente de atrito e geração de menores impactos ambientais. Novos tipos de revestimento tem sido estudado, como o revestimento de carbono semelhante ao diamante (DLC) que apresenta resultados superiores em relação ao

desempenho tribológico se comparado ao de uso convencional. A sigla DLC significa *Diamond Like Carbon* e representa uma família de camadas à base de carbono geralmente produzida pelo processo PACVD (*Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition*) (TYAGI *et al.*, 2019).

Em um estudo de desgaste e fricção, os anéis com revestimento de CrN e DLC foram aplicados a diferentes tipos de lubrificantes e aditivos de diferentes mercados e comparados. Em operação sem aditivo de molibdênio, o DLC superou o CrN em desgaste e em atrito. Já com aditivos de molibdênio o CrN reduziu significativamente o atrito e o desgaste em cerca de 9% e, o DLC obteve resultado de redução de desgaste em cerca de 6%. Sendo estimada uma redução de 0,4 % na redução do consumo de combustível em condições urbanas com o revestimento de CrN em relação ao de DLC (TYAGI *et al.*, 2019; BERGADO *et al.*, 2020; FU; CHAI, 2020;).

Vale ressaltar que os anéis de aço inoxidável que sofrem nitretação com alto teor de cromo na composição e com revestimento de CrN por processo de PVD tem sido uma alternativa para os fabricantes equilibrarem a eficiência e o custo, apresentando os mesmos resultados de redução de atrito e desgaste. Além da tecnologia de vácuo do processo de PVD auxiliar no atendimento às exigências ambientais (LIN *et al.*, 2016; WÖLFLE *et al.*, 2016; BERGADO *et al.*, 2020).

2.8.2. Nitretação

A nitretação é um método de deposição termoquímico da metalurgia. A nitretação gasosa promove ao aço propriedades encontradas em materiais metálicos e cerâmicos, como baixo coeficiente de atrito e elevada resistência aos desgastes abrasivo e adesivo. Este processo é realizado em fornos com atmosfera controlada, com estágios de aquecimento, difusão de gases e resfriamento, com controles precisos de temperatura e concentração de gases (PICCILLI *et al.*, 2011; SCHWEIZER; FUESSER, 2013).

Nesta técnica ocorre um crescimento das peças da ordem de $5 \mu\text{m}^3$, devido à difusão de gases e formação de nitretos na camada superficial do anel. Após o processo de nitretação, a camada nitretada difundida apresenta um gradiente de maior dureza, chegando a atingir 900 HV (67 HRC) a 0,05 mm e 700 HV (60 HRC) a 0,10 mm da superfície nitretada, pois a quantidade de nitrogênio inserido varia ao longo da camada nitretada (PICCILLI *et al.*, 2011; SCHWEIZER; FUESSER, 2013).

Na nitretação o núcleo do material não é alterado e ao seu redor existe uma região de ionotransição, onde o aumento da dureza não é significativo. Em seguida, encontra-se a região de difusão, que apresenta um aumento significativo na dureza, e por fim, na superfície do material a camada branca (Figura 13).

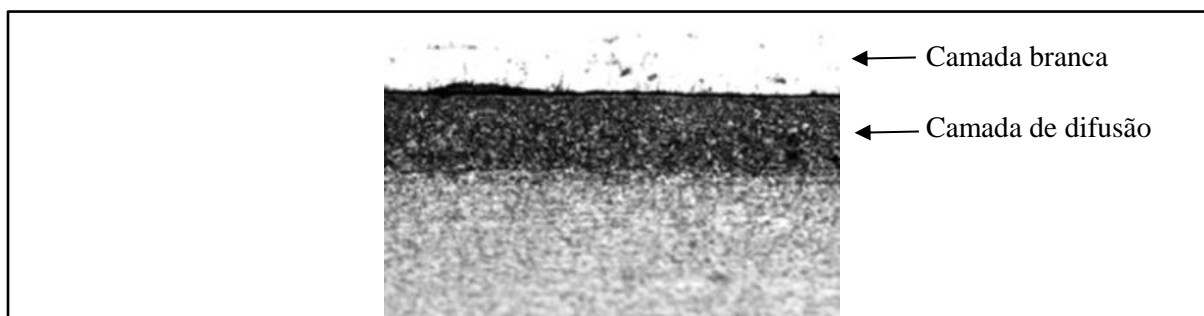


Figura 13 – Microestrutura de um material após a nitretação gasosa.

Fonte: Disponível em <<https://serrametal.com.br/processos-superficiais-nitretacao/>>, acesso em: 23.03.2022.

2.8.3. O processo de PVD (*Physical Vapor Deposition*)

O processo de deposição física de vapor (PVD) apresenta bom desempenho tribológico, sendo eficaz frente ao atrito e ao desgaste. Ele foi empregado para deposição de uma camada intermediária de cromo da ordem de 2 μm de espessura, seguida por outra de nitreto de cromo da ordem de 15 μm . O insumo inicialmente apresenta-se em formato circular, e por meio de um arco catódico torna-se vapor, e posteriormente é transferido para o substrato (anel). Esse processo é realizado à vácuo e sob altas temperaturas com controle de potencial e da pressão (Figura 14) (SCHWEIZER; FUESSER, 2013).

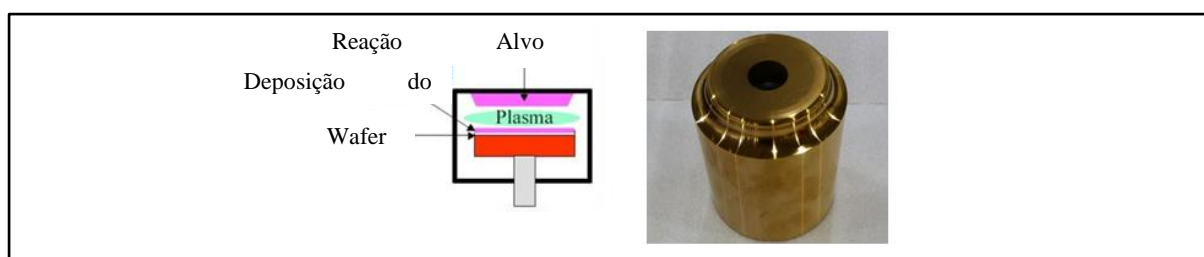


Figura 14 – Revestimento PVD.

Fonte: Disponível em: <<http://moldesinjecaoplasticos.com.br/limpeza-revestimento-cvd-pvd-texturizacao/>>, acesso em: 26.03.2022.

O processo PVD consiste então na deposição atomística, onde o material sólido (cátodo) é vaporizado em forma de íons ou moléculas, e transferido em direção ao substrato através de gases à baixa pressão ou plasma, onde se condensa. O PVD é limitado pela taxa de deposição sobre a superfície do anel, a qual consegue alcançar uma camada de revestimento

de aproximadamente 50 μm . A vaporização do material do revestimento pode ocorrer por diversos processos, o mais utilizado é através do aquecimento do material a temperaturas mais elevadas do que o ponto de ebulição. O aquecimento pode ser ocasionado por indução, filamento, feixe de elétrons, ou por transferência de energia devido ao impacto dos íons (ROSSNAGEL *et al.*, 1990).

Algumas vantagens são destacadas quanto aos processos PVD: possibilidade de operar a baixas pressões; melhoria de adesão do revestimento ao substrato; espessura de recobrimento uniforme; controle da espessura cristalina; o bombardeamento iônico fomenta o crescimento epitaxial e melhora a mobilidade atômica em temperaturas de deposição relativamente baixas (150 a 400 °C) (ROSSNAGEL *et al.*, 1990; SCHWEIZER; FUESSER, 2013).

Os recobrimentos podem ser realizados por diferentes técnicas, sendo mais utilizadas industrialmente as técnicas de “*Sputtering*” e “Arco Catódico” (ANDERS, 1999). A técnica de arco catódico é eficiente para produtividade e fatores econômicos, atendendo aos requisitos de produção em grande escala, muito utilizado em setores automotivos para proteção contra o desgaste e redução de atrito. O processo é realizado pela vaporização do cátodo sólido por meio da erosão de arcos que trabalham com altas correntes elétricas e baixa tensão. Na sequência, o material vaporizado se converte em plasma gasoso (tipo de fluido que conduz os eletrodos), e por fim, ocorre à condensação energética no substrato dos íons dos plasmas, sendo que sua densidade é diretamente proporcional à corrente de descarga do arco. Este método tem as vantagens de boa aderência e a facilidade de formação da camada do revestimento (ROSSNAGEL *et al.*, 1990; SCHWEIZER; FUESSER, 2013).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Objeto de Estudo

O objeto de estudo definido é um anel de pistão que tem como material base o aço inoxidável martensítico MS066-1 que apresenta a composição química mostrada na Tabela 5.

Tabela 5: Composição química do aço inoxidável MS066-1

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Outros
MS066-1	0,80	0,50	0,25	0,04	0,04	17,0	1,00	0,08	0,55	0,1
	0,95	máx.	0,40	máx.	máx.	18,0	1,25	0,15	máx	máx

Ao longo do processo de fabricação do anel de pistão este material passa por um processo de nitretação gasosa se tornando um MS066-N1, aumentando a resistência ao desgaste do material e adquirindo as especificações de dureza conforme é demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6: Dureza Vickers do MS066-N1

Posição da Camada	Dureza Vickers	Posição da endentação
Face de contato	700 HV0,1 min	0,020 mm
Face lateral	700 HV0,1 min	0,020 mm

Na Figura 15 é possível evidenciar um exemplo da secção transversal de um anel de pistão após o processo de nitretação.

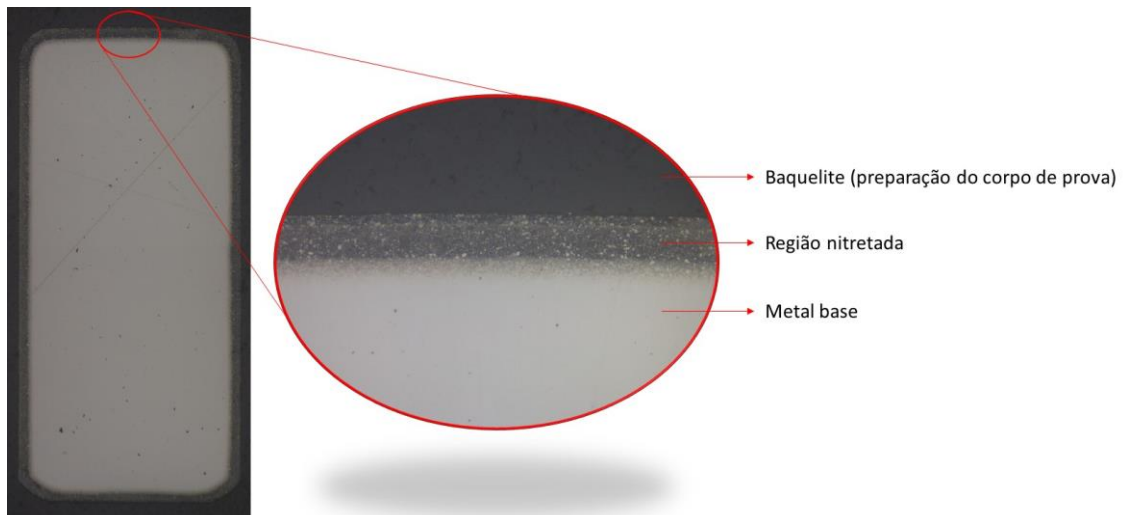


Figura 15: Secção transversal do anel de pistão após nitretação (50x) e detalhe da região nitretada (200x)

Como revestimento superficial da face de contato dessa tecnologia de anéis de pistão é utilizada uma camada de nitreto de cromo que é aplicada pelo processo de deposição física de vapor (PVD). Esse revestimento tem como característica uma fina camada intermediária de cromo (*interlayer*), entre o material nitretado e a camada mais espessa de nitreto de cromo. A dureza dessa cobertura de nitreto de cromo varia de 800 a 1200 HV0,050.

Na Figura 16 é possível evidenciar a secção transversal de um anel de pistão após a aplicação da camada de nitreto de cromo.

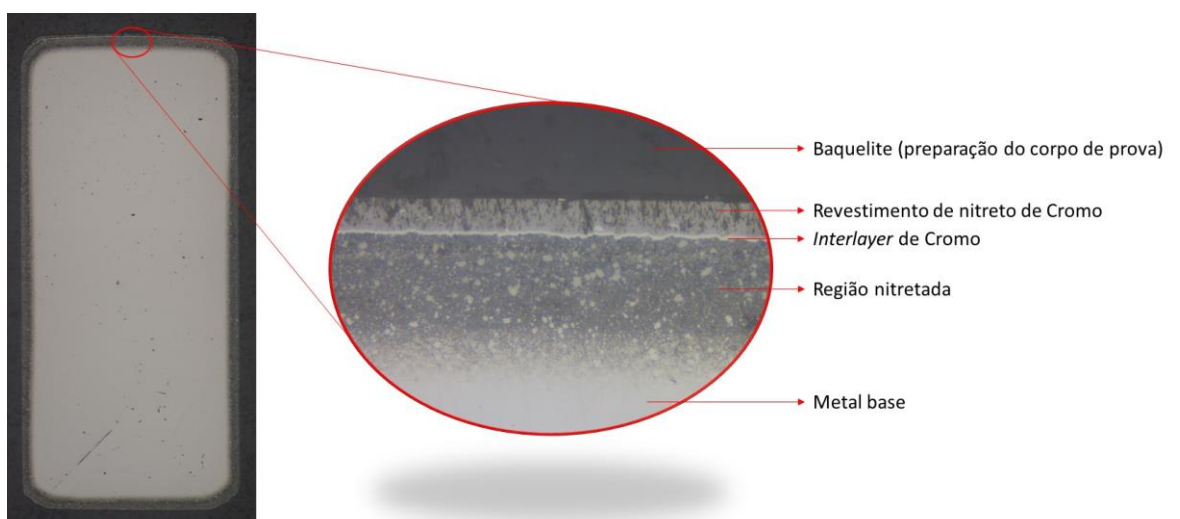


Figura 16: Secção transversal do anel de pistão após aplicação de nitreto de cromo (50x) e detalhe do revestimento (500x)

3.2. Característica de Resposta - Folga Entre Pontas

Nesse trabalho a característica dimensional estudada é a de folga entre pontas, que é uma das respostas mais crítica para o controle de qualidade na fabricação deste anel de pistão.

Essa característica é determinada pela distância entre as duas extremidades do produto quando confinado na camisa do cilindro (Figura 17). Tal característica influencia na vedação da câmara de combustão e no consumo de óleo, impactando diretamente no rendimento e na vida do motor.



Figura 17 - Folga entre pontas nos anéis de pistão.

Fonte: Disponível em: <<https://www.ms-motorservice.com.br/tecnipedia/post/folga-entre-as-extremidades-do-anel-de-pistao>>, acesso em: 26.03.2022.

A folga entre pontas é determinada indiretamente pelas operações que influenciam no diâmetro do anel, como lapidação, retificação de perfil, nitretação gasosa e revestimento de nitreto de cromo, sendo diretamente determinada pela operação de retificação de *gap*. Com as tendências de redução de tolerâncias nas empresas de autopeças, buscam-se processos cada vez mais precisos e mais estáveis para definição desta característica.

Na Figura 18 são mostradas as características dos anéis de pistão em estado livre e confinado no cilindro do motor. Vale ressaltar que a característica folga entre pontas estudada neste trabalho é representada pela cota 07.

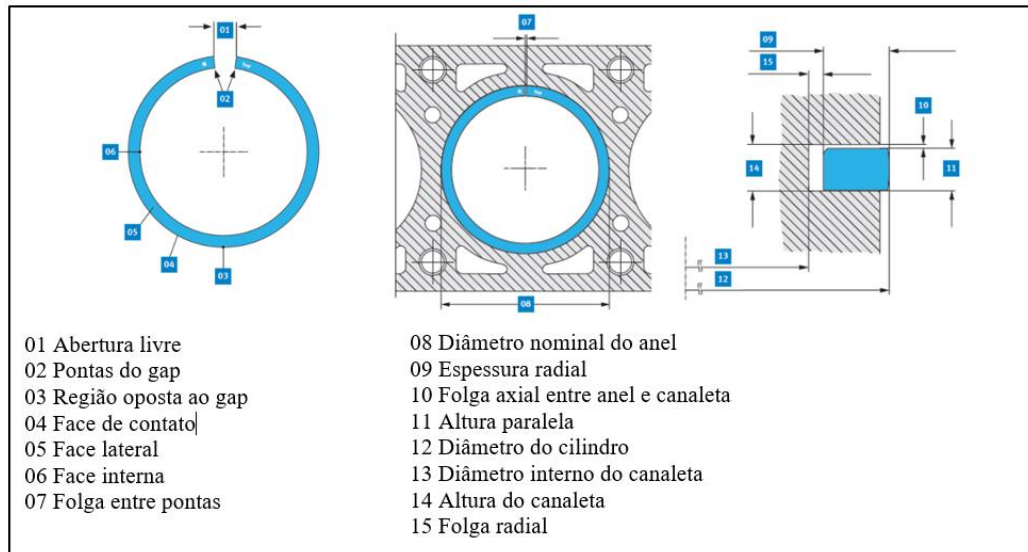


Figura 18 – Representação das características dos anéis de pistão

Fonte: Disponível em: <<https://www.ms-motorservice.com.br/tecnipedia/post/folga-entre-as-extremidades-do-anel-de-pistao>>, acesso em: 26.03.2022.

3.3. Máquina e Processo de Usinagem

A máquina escolhida para a execução do experimento foi uma retificadora de topo CNC do fabricante Waysia, modelo PR-GS/(NC)-40-160, mostrada na Figura 19. As especificações técnicas da máquina estão disponíveis na Tabela 7.

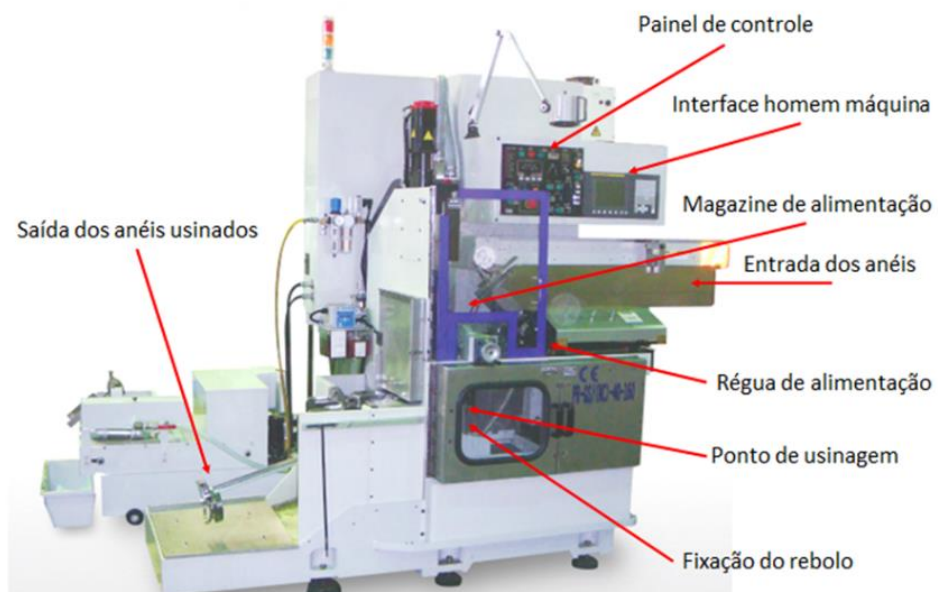


Figura 19 – Retificadora e seus componentes

Fonte: Waysia (2021).

Tabela 7: Especificações da máquina

Descrição	Especificação
Diâmetro de usinagem	Ø40 ~ Ø160 mm
Tipo de rebolo	CBN OD Ø125 mm x ID 22 mm
Rotação do eixo	3.000 ~ 6.000 rpm (máx)
Controlador CNC	Fanuc 0i mate-Model TF
Tensão elétrica	440 V / 60 Hz
Dimensões da máquina	3.000 x 1.800 x 2.500 mm
Peso da máquina	2.000 kg

Selecionada a máquina foi verificado o alinhamento dos eixos “x” e “z” e a existência de folgas nos sistemas mecânicos, com objetivo de eliminar possíveis ruídos no processo de usinagem e nos resultados do experimento.

A operação de usinagem do anel para definir a característica de folga entre pontas é uma retificação por mergulho, onde os anéis são alimentados na máquina por meio de um magazine, em que uma régua empurradora conduz os anéis até a entrada de uma bucha. Posteriormente, um cilindro (eixo “z”) perpendicular ao eixo do rebolo conduz os anéis até o ponto de usinagem, no qual o rebolo rotaciona no sentido anti-horário.

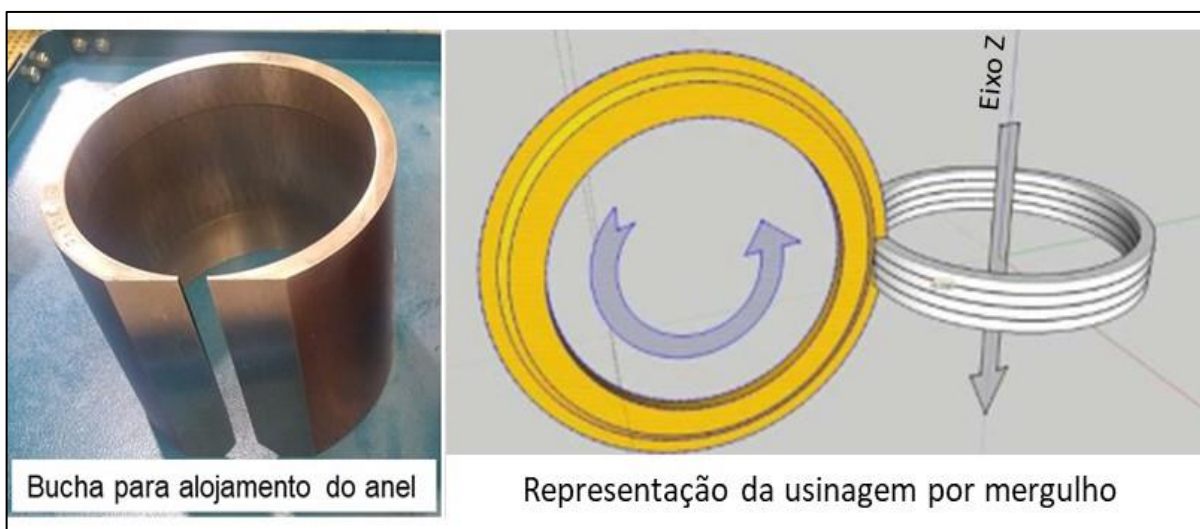


Figura 20 – Bucha para alojamento das peças e representação da usinagem

3.4. Rebolo

O primeiro passo para avaliar a viabilidade do experimento foi verificar os tipos de rebolos e suas respectivas granulometrias para o processo de retificação. Posteriormente, foi analisada a fundamentação teórica para desenvolver opções diferentes de granulometria, realizar os ensaios experimentais e avaliar os resultados dimensionais para a característica de folga entre pontas dos anéis de pistão.

Três diferentes granulometrias foram selecionadas para a criação do planejamento experimental. As especificações dos rebolos estão disponíveis na Tabela 8.

Tabela 8: Especificação dos rebolos

Tipo de Grão Abrasivo	Granulometria	Diâmetro do grão	Diâmetro Externo
CBN	B46	38 - 45 μm	124,80 \pm 0,10 mm
CBN	B64	53 - 63 μm	124,80 \pm 0,10 mm
CBN	B76	63 - 75 μm	124,80 \pm 0,10 mm

Um exemplo do rebolo utilizado nos experimentos é mostrado na Figura 21.



Figura 21 – Exemplo de rebolo utilizado no experimento

3.5. Sistema de Medição

Para realizar a medição da característica de folga entre pontas alguns equipamentos foram utilizados. Na Figura 22 são mostrados os seguintes dispositivos: suporte para medição, calibre com diâmetro definido e lâmina graduada.



Figura 22 – Equipamentos para a medição da folga entre pontas

Para a realização da medição da característica de folga entre pontas é necessário confinar o anel no calibre, para que a folga entre pontas fique evidente, conforme mostrado na Figura 23.

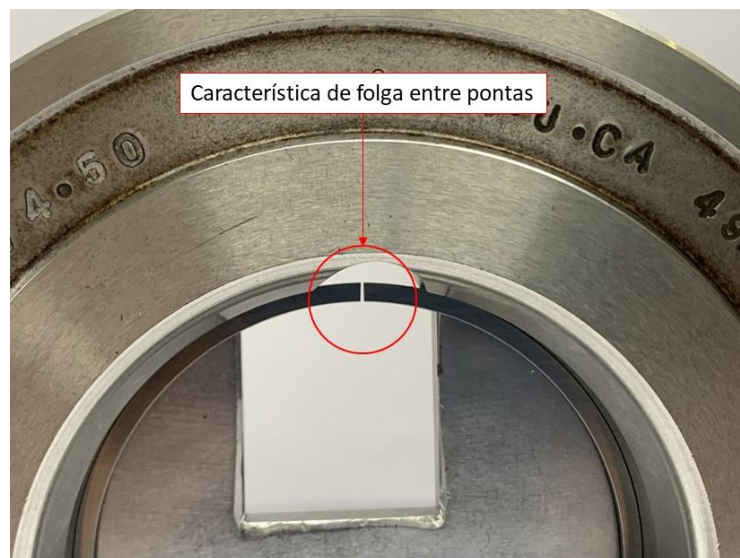


Figura 23 - Folga entre pontas do anel confinado no calibre

Com o anel confinado no calibre, basta posicionar o conjunto anel e calibre sobre o suporte e inserir a lâmina para realizar a leitura da medição, conforme ilustrado na Figura 24.

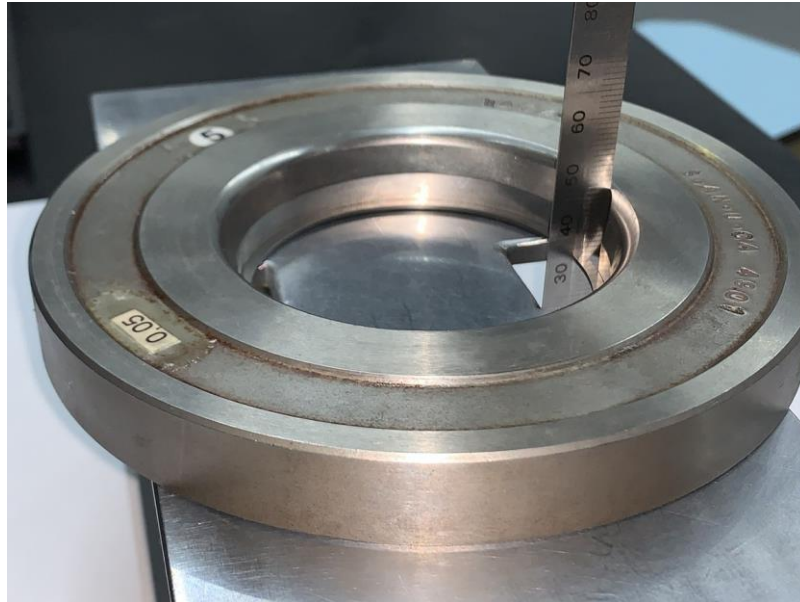


Figura 24 – Medição da característica de folga entre pontas.

3.6. Metodologia Experimental

A metodologia aplicada neste trabalho é a do tipo experimental combinada com a utilização de análise estatística, a qual permitiu identificar e analisar os parâmetros do processo de retificação da característica dimensional de folga entre pontas em anéis de pistão. Os resultados foram analisados com auxílio do *software* Minitab.

Para conduzir o trabalho de otimização dos parâmetros do processo de retificação foi necessário realizar algumas etapas de acordo com o planejamento. As principais atividades que foram realizadas estão apresentadas no fluxograma da Figura 25.

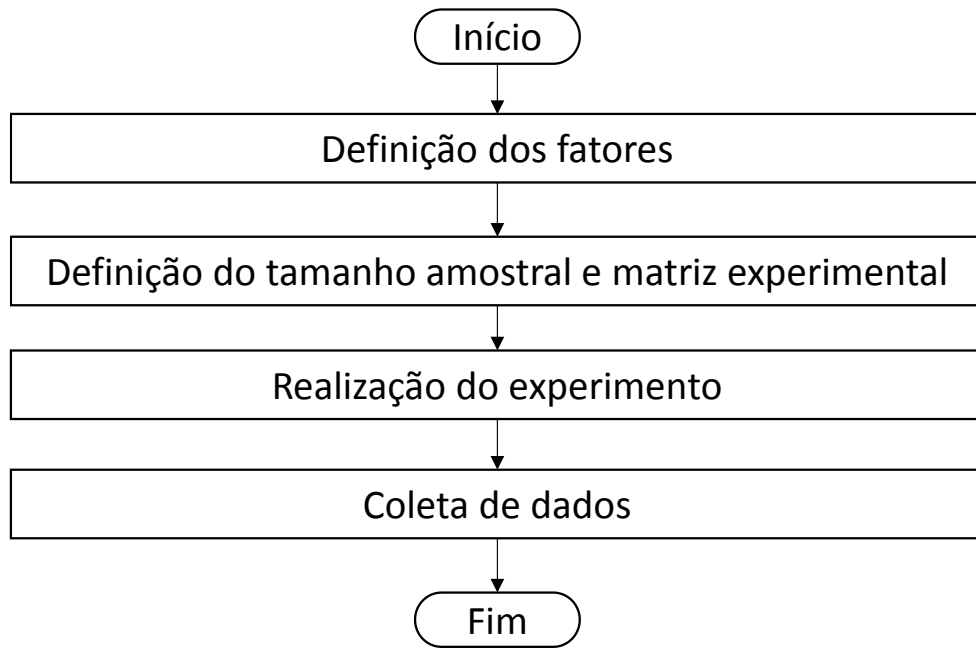


Figura 25- Fluxograma com os principais passos da pesquisa.

3.6.1. Definição dos fatores

A primeira etapa para condução deste trabalho foi definir os fatores e seus níveis para realização do experimento. Para definição dos parâmetros a serem estudados no DOE foi analisado o processo atual desenvolvido pela equipe de engenharia da empresa. Onde constatou-se que o rebolo utilizado era de CBN e de granulometria B64, sendo aplicado em uma rotação de 4400 RPM e com velocidade de alimentação de 12 golpes por minuto (GPM). Assim, para definir os níveis dos parâmetros, utilizou-se esses valores pré-definidos como centrais e adotou-se parâmetros com valores inferiores e superiores, de acordo com a limitação técnica da máquina retificadora. Os parâmetros de usinagem definidos em três níveis estão disponíveis na Tabela 9.

Tabela 9 - Definição de parâmetros de usinagem

Fator	Níveis por Fator		
	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Granulometria do Rebolo de CBN	325/400 (B46)	230/270 (B64)	200/230 (B76)
Rotação do Rebolo (RPM)	3.800	4.400	5.000
Avanço de usinagem (GPM)	8	12	16

3.6.2. Definição do tamanho amostral e matriz experimental

O tamanho da amostra foi definido com base no tamanho padrão de lote de peças para este processo de retificação na linha produção de anéis de pistão da empresa. O lote padrão é de 2000 peças, das quais foram segregadas 530 peças para a validação dos resultados e parâmetros ótimos. O restante das 1470 peças foram divididas igualmente para os 42 experimentos, resultando na amostragem de 35 peças para cada corrida experimental. A matriz DOE foi criada seguindo os passos do fluxograma apresentado na Figura 26.

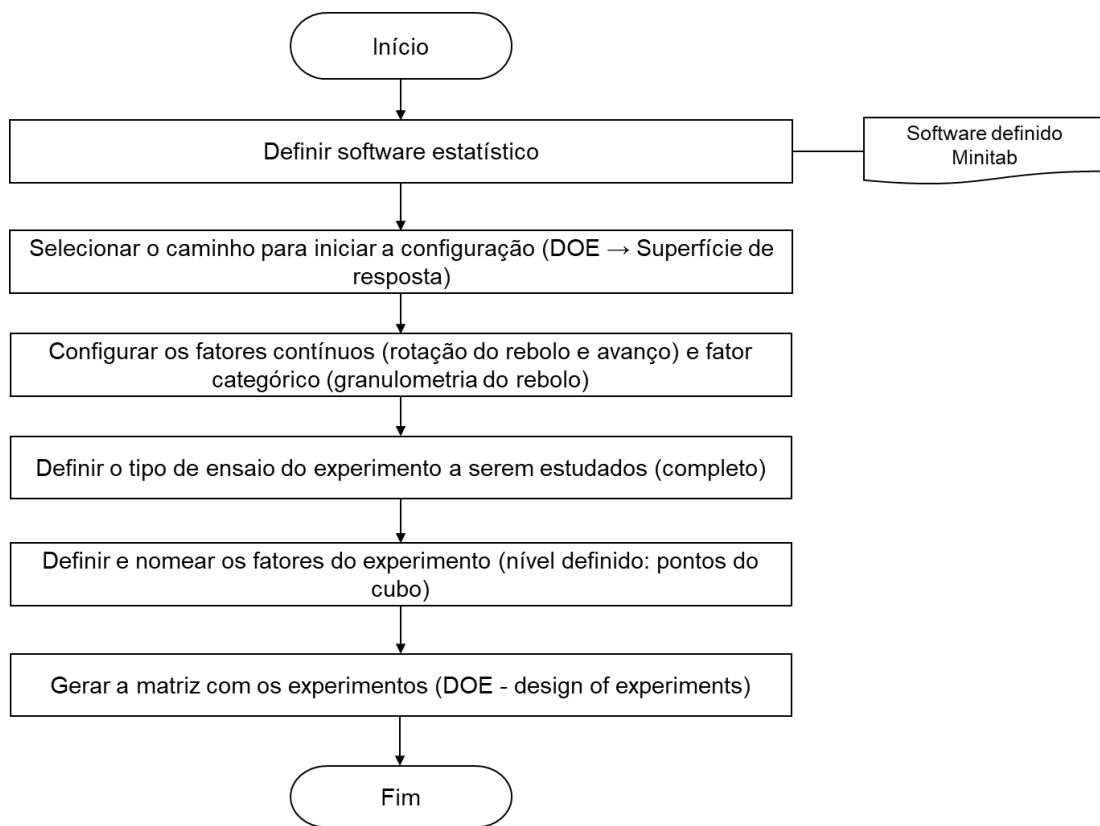


Figura 26- Fluxograma para geração da matriz DOE

A sequência dos experimentos foi gerada com dois fatores contínuos: a rotação do rebolo e o avanço de usinagem; e um fator categórico, a granulometria do rebolo. A matriz experimental montada foi do tipo composto central, com fatorial completo utilizando pontos centrais. Nesta matriz foram geradas 42 ensaios, sendo 12 pontos fatoriais, 9 pontos centrais no cubo, 12 são pontos axiais (também chamados pontos estrela) e 9 são pontos axiais centrais, com valor de alfa (α) igual a 1,41421.

Devido a dificuldade de troca do rebolo na máquina, o fator granulometria não foi aleatorizado na configuração do experimento. Os demais fatores foram aleatorizados para reduzir as interferências e os erros sistemáticos do processo. Na Tabela 10 está mostrada a sequência dos experimentos.

Tabela 10 – Matriz de experimentos

OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	Rotação do Rebolo (RPM)	Avanço (GPM)	Granulometria do rebolo
1	1	1	1	3800	8	46
2	2	1	1	5000	8	46
3	3	1	1	3800	16	46
4	4	1	1	5000	16	46
5	5	0	1	4400	12	46
6	6	0	1	4400	12	46
7	7	0	1	4400	12	46
8	8	1	1	3800	8	64
9	9	1	1	5000	8	64
10	10	1	1	3800	16	64
11	11	1	1	5000	16	64
12	12	0	1	4400	12	64
13	13	0	1	4400	12	64
14	14	0	1	4400	12	64
15	15	1	1	3800	8	76
16	16	1	1	5000	8	76
17	17	1	1	3800	16	76
18	18	1	1	5000	16	76
19	19	0	1	4400	12	76
20	20	0	1	4400	12	76
21	21	0	1	4400	12	76
22	22	-1	2	3551	12	46
23	23	-1	2	5249	12	46
24	24	-1	2	4400	6	46
25	25	-1	2	4400	18	46
26	26	0	2	4400	12	46

Tabela 11 – Matriz de experimentos (continuação)

OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	Rotação do Rebolo (RPM)	Avanço (GPM)	Granulometria do rebolo
27	27	0	2	4400	12	46
28	28	0	2	4400	12	46
29	29	-1	2	3551	12	64
30	30	-1	2	5249	12	64
31	31	-1	2	4400	6	64
32	32	-1	2	4400	18	64
33	33	0	2	4400	12	64
34	34	0	2	4400	12	64
35	35	0	2	4400	12	64
36	36	-1	2	3551	12	76
37	37	-1	2	5249	12	76
38	38	-1	2	4400	6	76
39	39	-1	2	4400	18	76
40	40	0	2	4400	12	76
41	41	0	2	4400	12	76
42	42	0	2	4400	12	76

3.6.3. Realização do experimento

Para a realização do experimento foi necessário separar as amostras de 35 peças para cada um dos 42 ensaios parametrizados conforme definido pela matriz experimental. Após os experimentos realizados, iniciou-se a inspeção dimensional de 100% das peças para obter os dados necessários para a análise estatística dos resultados, que será apresentada no Capítulo 4. Neste processo, os limites de especificação dimensional da característica folga entre pontas definida em projeto é de 0,27-0,39 mm, com média de 0,33 mm. Vale ressaltar que o objetivo de parametrizar este processo é atingir o valor médio (alvo) da especificação dimensional dos anéis de pistão.

4. RESULTADOS

4.1. Análise preliminar dos modelos de variáveis de resposta

Este capítulo apresenta os resultados encontrados nos ensaios experimentais e as análises estatísticas realizadas para a otimização do processo de obtenção da dimensão da folga entre ponta dos anéis de pistão de aço inoxidável martensítico nitretado e recoberto com nitreto de cromo.

De forma preliminar foi realizada uma modelagem de diversas métricas estatísticas para a característica folga entre pontas. Modelagem da média, da mediana, do desvio padrão, do índice Cpk e da quantidade de lascas visualizadas nos anéis de pistão. Esta modelagem foi realizada após a obtenção dos resultados das métricas dos 42 experimentos, sendo que cada experimento tinha um pacote com 35 anéis. Neste estudo observou-se que a quantidade lascas não foi significativa para o processo, bem como a modelagem do índice de capacidade (Cpk) e do desvio padrão não apresentaram modelos com boa previsibilidade, conforme mostrado na Tabela 11. No entanto, os modelos de média e mediana tiveram bons ajustes, com R^2 (aj) próximos de 80%, o que contribui para validar os experimentos. Neste trabalho optou-se pelo estudo da média, uma vez que o objetivo preconizado é atingir o valor médio da especificação de folga entre pontas.

Tabela 12 – Valores de R^2 e R^2 (aj) para as diferentes variáveis de resposta

Variável avaliada	R^2	R^2 (aj)
Cpk	64,79%	50,21%
Média	84,58%	78,21%
Mediana	85,35%	79,28%
Desvio padrão	51,41%	31,31%
Quantidade de lasca	88,68%	84%

4.2. Modelo da dimensão média de folga entre pontas

Por meio do modelo baseado na média de folga entre pontas foram obtidas as seguintes equações para cada tipo de rebolo: B46 (Equação 17), B64 (Equação 18) e B76 (Equação 19).

$$\bar{S}_1 = 0,665 - 0,000125 n - 0,00575 V_f - 0,000157 V_f^2 \quad (17)$$

$$\bar{S}_1 = 0,558 - 0,000117 n - 0,00298 V_f - 0,000157 V_f^2 \quad (18)$$

$$\bar{S}_1 = 0,528 - 0,000116 n - 0,00028 V_f - 0,000157 V_f^2 \quad (19)$$

Onde:

\bar{S}_1 : média de folga entre pontas;

n : rotação do rebolo;

V_f : avanço de usinagem (GPM).

Na Tabela 12 é mostrada a análise de variância (ANOVA), onde é possível verificar a associação entre a resposta folga entre pontas e cada termo no modelo. Observa-se que o termo mais significativo foi o avanço de usinagem (V_f), seguido pela granulometria do rebolo e pela interação avanço de usinagem-granulometria do rebolo, apresentando valores de P menores que 0,05. Observa-se, que o valor R-Quadrado R^2 (aj) atendeu 78,21% do ajuste.

Tabela 13: Análise de variância para folga entre pontas dos anéis de pistão

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	12	0,022330	84,58%	0,022330	0,001861	13,26	0,000
Blocos	1	0,002150	8,14%	0,002150	0,002150	15,32	0,001
Linear	4	0,016954	64,22%	0,016954	0,004239	30,20	0,000
<i>n</i>	1	0,000217	0,82%	0,000217	0,000217	1,55	0,224
<i>V_f</i>	1	0,013456	50,97%	0,013456	0,013456	95,89	0,000
Granulometria do rebolo	2	0,003281	12,43%	0,003281	0,001640	11,69	0,000
Quadrado	2	0,000744	2,82%	0,000744	0,000372	2,65	0,088
<i>n</i> * <i>n</i>	1	0,000605	2,29%	0,000558	0,000558	3,98	0,056
<i>V_f</i> * <i>V_f</i>	1	0,000139	0,53%	0,000139	0,000139	0,99	0,328
Interação com 2 Fatores	5	0,002482	9,40%	0,002482	0,000496	3,54	0,013
<i>n</i> * <i>V_f</i>	1	0,000002	0,01%	0,000002	0,000002	0,01	0,918
<i>n</i> *Granulometria do rebolo	2	0,000154	0,58%	0,000154	0,000077	0,55	0,584
<i>V_f</i> *Granulometria do rebolo	2	0,002326	8,81%	0,002326	0,001163	8,29	0,001
Erro	29	0,004070	15,42%	0,004070	0,000140		
Falta de ajuste	17	0,003680	13,94%	0,003680	0,000216	6,67	0,001
Erro puro	12	0,000390	1,48%	0,000390	0,000032	*	*
Total	41	0,026400	100,00%				
Sumário do modelo		S	R²	R²(aj)	PRESQ	R²(pred)	
		0,0118464	84,58%	78,21%	0,0122767	53,50%	

Na Figura 27 é mostrado o gráfico de Pareto que auxilia na visualização dos efeitos padronizados das variáveis de controle na resposta, confirmando que o avanço é o termo mais significativo, seguido pela granulometria do rebolo e pela interação avanço-granulometria do rebolo. Vale salientar que o termo quadrático da rotação também pode ser considerado como influência significativa na resposta.

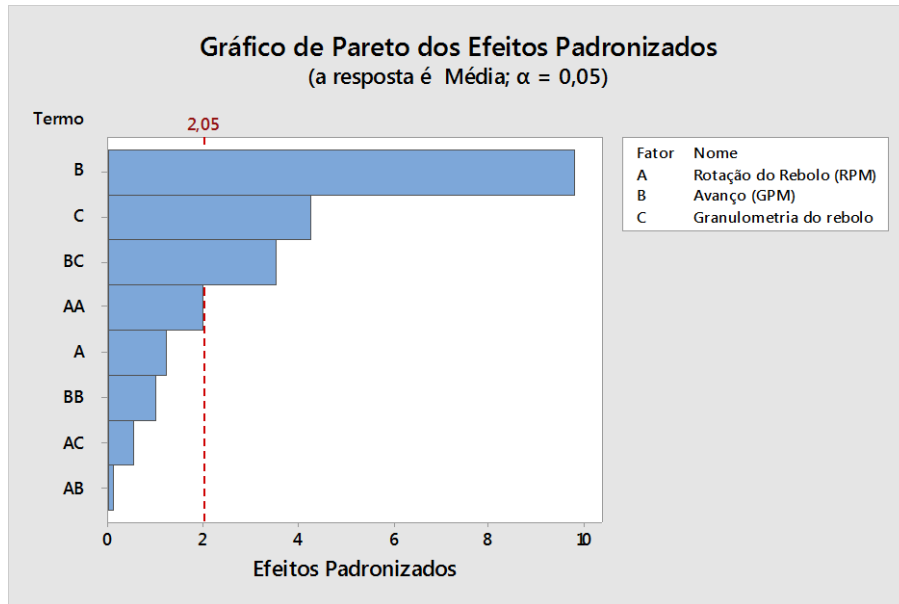


Figura 27 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis de entrada

Na Figura 28 são mostrados de maneira individual os efeitos principais das variáveis de entrada na resposta folga entre pontas. A medida que aumentou a rotação do rebolo maior a probabilidade de se atingir o valor especificado da folga de 0,33 mm. Já para o avanço de usinagem (GPM) tem-se o contrário, quanto menor o seu valor, maior a tendência de atingir o valor do alvo da folga entre pontas. A mesma analogia também pode ser aplicada para a granulometria do rebolo, onde observa-se que o rebolo com granulometria B46, ou seja com menor tamanho de grão esteve mais próximo do valor especificado de 0,33 mm.

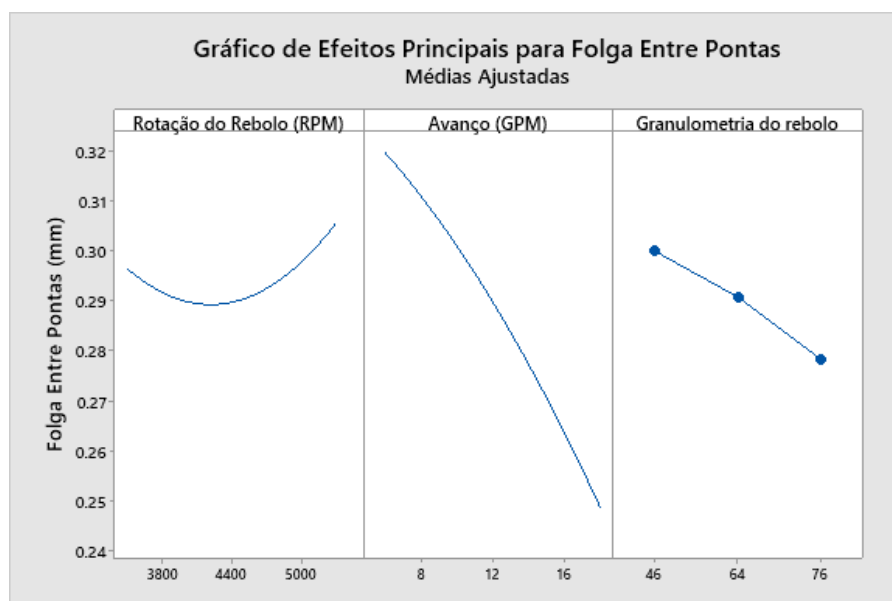


Figura 28 - Efeitos principais das variáveis de entrada na resposta

Os maiores valores de rotação do rebolo (RPM) contribuirão significativamente para alcançar a dimensão média de folga entre pontas (0,33mm) e reduzir a variabilidade. Isto se deve ao fato de que quanto maior rotação menor será o desgaste dos grãos abrasivos, possibilitando maior estabilidade dimensional do processo de retificação.

O avanço (GPM) é o fator mais significativo devido ao tempo em que os anéis permanecem em contato com os grãos abrasivos do rebolo. Quanto menor o avanço, maior será o tempo de contato entre a peça e os grãos abrasivos do rebolo (área de corte), tendo como efeito maior precisão e estabilidade dimensional ao longo do fluxo de produção em série.

O rebolo com menor granulometria (B46) apresentou o melhor resultado em comparação com os demais rebolos testados. Para esta operação, quanto menor o tamanho dos grãos abrasivos, menor é a taxa de remoção de material e maior será a estabilidade e controle dimensional da peça objeto de estudo.

Na Figura 29 é mostrado a curva de superfície de resposta em que é apresentado os efeitos das combinações dos fatores avanço e rotação do rebolo na característica folga entre pontas, para o rebolo com granulometria B46. Observou-se que em baixos avanços tem-se uma maior dimensão de folga entre pontas. A rotação média de 4500 RPM tende a estabilizar os valores dimensionais da folga próximos do alvo do processo de 0,33 mm.

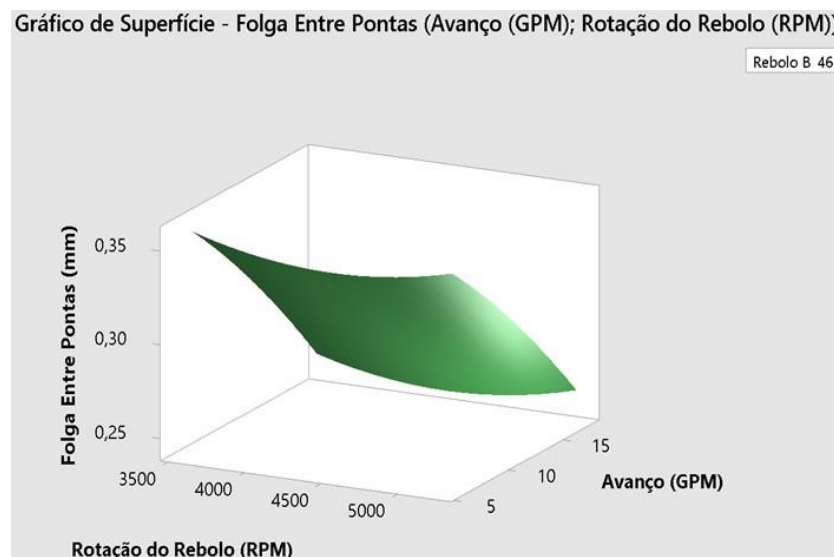


Figura 29 - Superfície de resposta para folga entre pontas versus avanço e rotação (Rebolo B46)

A mesma analogia acontece analisando os resultados da folga entre pontas em função do avanço e rotação para o rebolo de CBN com granulometria B64, conforme mostrado na

Figura 30. Neste caso, os resultados de superfície de resposta obtidos para a folga entre pontas apresentaram comportamento similar ao do rebolo de granulometria B46, porém os valores dimensionais não atingiram o alvo especificado (0,33mm). Este fato pode ser explicado em função do rebolo ter maior granulometria e portanto maior agressividade, que provoca maior instabilidade e variabilidade no processo.

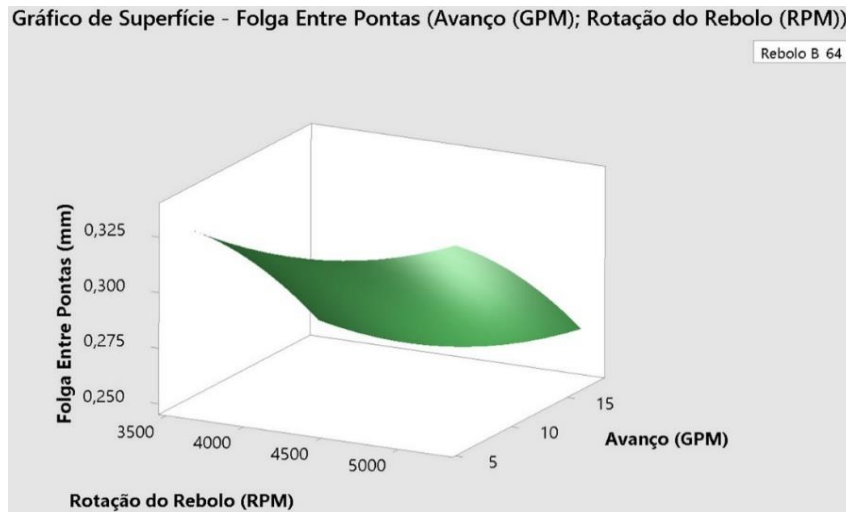


Figura 30 - Superfície de resposta para folga entre pontas versus avanço e rotação (Rebolo B64)

Na Figura 31 é mostrado para o rebolo de CBN de granulometria B76 que em baixos valores de avanço e elevados valores de rotação da máquina, tem-se uma tendência de aumento dos valores dimensionais da folga. Entretanto, mesmo nestas condições não se conseguiu valores dimensionais de folga na especificação de 0,33 mm, em função do maior tamanho de grão e agressividade deste rebolo de CBN.

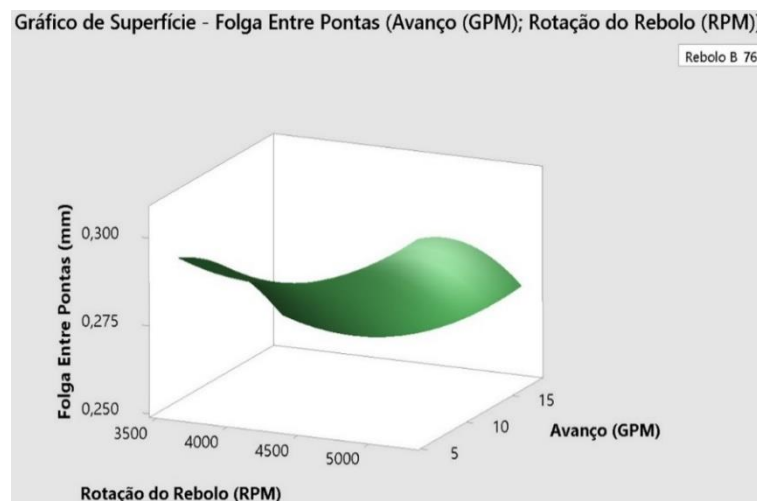


Figura 31 - Superfície de resposta para folga entre pontas versus avanço e rotação (Rebolo B76)

Na Figura 32 são mostradas as interações das variáveis de entrada rotação da máquina, avanço e tamanho de grão do rebolo nos valores da folga entre pontas dos anéis.

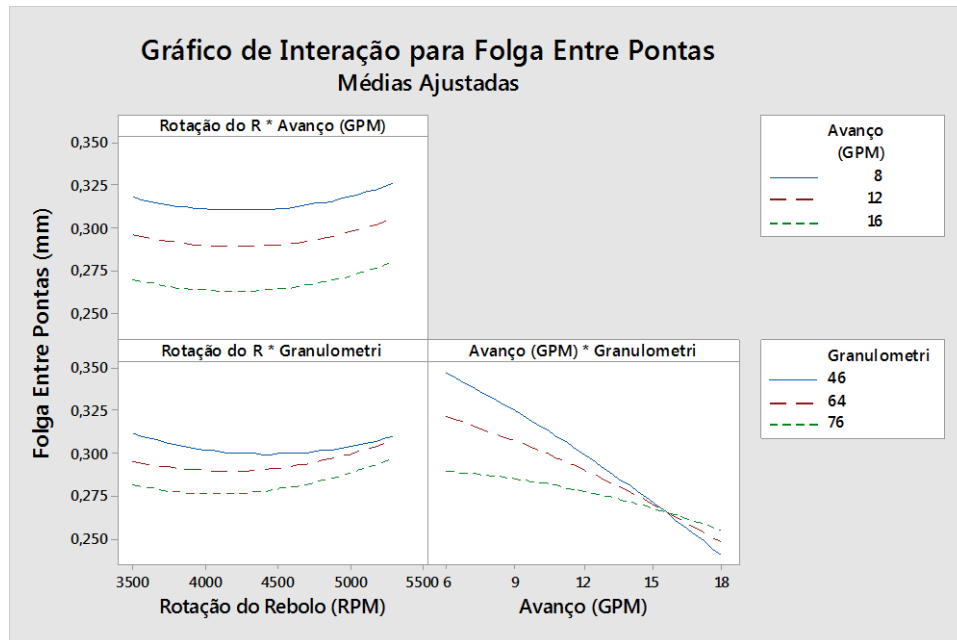


Figura 32 – Folga entre pontas versus interação das variáveis de entrada

A curva de interação Rotação do Rebolo combinado com o Avanço (GPM) mostra que o efeito do menor avanço combinado com a rotação máxima do experimento apresenta uma maior tendência de se atingir o valor dimensional do alvo da folga de 0,33mm. O rebolo de menor granulometria (B46) combinado com baixo avanço tem maior tendência de atingir o alvo da especificação. Em altos avanços, o efeito do tamanho de grão do rebolo não é significativo no valor da folga. Neste caso os valores da folga ficaram longe do alvo e praticamente fora do limite de especificação. Na interação entre rotação e tamanho de grão do rebolo pode-se verificar que somente a granulometria B46 pode atingir o alvo da especificação da folga entre pontas dos anéis.

4.3 Parâmetros de otimização do processo

Para encontrar o ponto ótimo utilizou-se o método de otimização de processo *desirability*, conforme apresentado na Figura 33. O objetivo é encontrar a parametrização ótima das condições de corte para atingir a média da folga entre pontas no processo de retificação dos anéis de pistão.

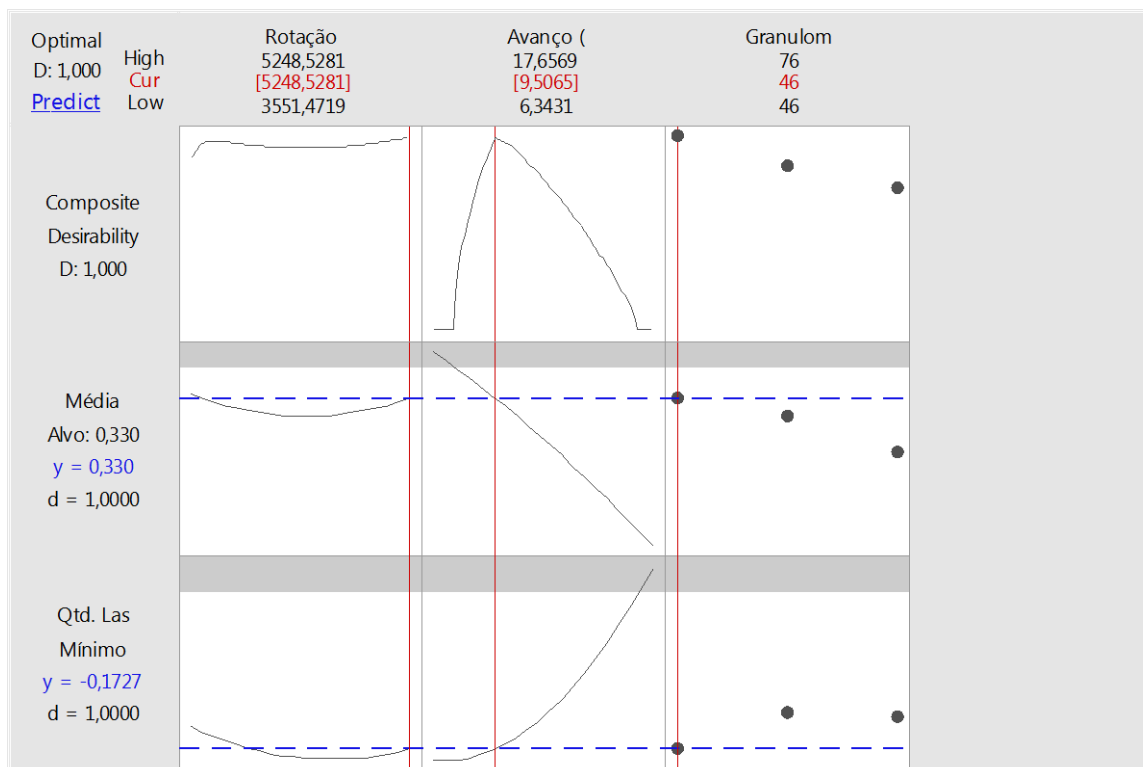


Figura 33 - Gráfico de otimização de processo

Este gráfico foi gerado com o auxílio do software estatístico (Minitab), baseado nos valores dimensionais de folga entre pontas.

Aplicando o método *desirability* tem-se o valor “ótimo D” igual a 1 (um) que é a desejabilidade global de atendimento, que neste caso de uma variável de resposta de folga média igual a 0,33 mm. A combinação ótima dos parâmetros de entrada foi com rotação de 5248 RPM, avanço de 9,50 GPM, e granulometria do rebolo B46. Ou seja, a condição ótima do processo para se atingir o alvo da especificação foi com rotação alta, avanço baixo e rebolo com pequeno tamanho de grão.

4.4 Validação dos parâmetros otimizados

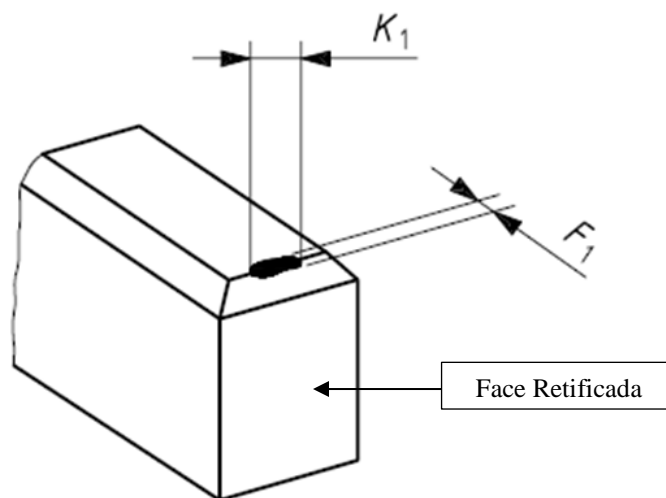
Ao finalizar todas as análises da metodologia de superfície de resposta e com os pontos ótimos definidos, fez-se necessário confirmar a parametrização de otimização das condições de corte com objetivo de atingir a dimensão média da folga entre pontas (0,33 mm) da operação de retificação.

Com intuito de validar os resultados obtidos na metodologia de superfície de resposta e método *desirability*, optou-se por realizar um estudo de capacidade do processo antes e após

a operação de retificação dos anéis com os parâmetros ótimos próximos aos obtidos e disponíveis na máquina: Rotação de 5200 RPM, avanço de 9,0 GPM e rebolo com granulometria B46.

O objetivo de realizar a análise dimensional das peças antes de se executar a operação de retificação é conhecer a dispersão dimensional da folga entre pontas dos anéis previamente. Assim, ao executar a operação com os parâmetros de processo otimizados pode-se validar a eficácia da otimização, onde a expectativa é que o processo esteja ajustado para entregar peças ao longo da produção em série de anéis de pistão com valores dimensionais da folga entre pontas no valor médio de 0,33 mm e com baixa variabilidade.

Além do controle dimensional da folga nesta etapa de fabricação é necessário fazer uma inspeção visual dos anéis. Pois durante o processo de retificação pode ocorrer uma avaria ou uma lasca na camada de recobrimento (nitreto de cromo) do anel. Na Figura 34 é mostrada uma lasca na camada de cobertura da face de contato, próxima à face retificada da ponta do anel de pistão.



Onde:

K_1 - representa a dimensão do defeito no sentido axial do anel;

F_1 - representa a dimensão do defeito no sentido circunferencial;

Figura 34 – Lasca na face das pontas dos anéis

Fonte: ISO 6621-5 2 ed., (2005).

Os ensaios de validação foram realizados em 4 (quatro) etapas:

- 1- Coletar uma amostra de 125 peças que ainda não havia sido retificada;
- 2- Identificar as peças coletadas em números sequenciais (1 a 125) e realizar a análise dimensional de folga entre pontas para análise de capacidade. O intuito é avaliar a variabilidade do processo antes de realizar a operação de retificação;
- 3- Usinar as 125 peças com os parâmetros otimizados: rotação de 5200 RPM, avanço de 9,0 GPM, com rebolo de CBN de granulometria B46;
- 4- Coletar os dados dimensionais das peças usinadas e realizar um novo estudo de capacidade para verificar a dispersão dos resultados. Os índices de capacidade Pp, Ppk, Cp e Cpk estão mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Análise de capacidade antes e depois da retificação

Estudo de capacidade (Folga Entre Pontas)		
Índice	Antes	Depois
Pp	1,27	4,87
Ppk	0,52	4,72
Cp	2,57	7,5
Cpk	1,06	7,27
Desvio Padrão	0,015692	0,0041057

Na Figura 35 são mostrados os índices de capacidade e a variabilidade da folga entre pontas antes da operação de retificação. Observou-se que o processo apresentava uma grande dispersão, com desvio-padrão global dos valores de folga de 0,015692, e uma média amostral de processo de 0,294677 mm bem distante do alvo. Em razão disto, o processo apresentava baixos índice de capacidade, com potencialidade de produzir uma grande quantidade de itens fora dos limites de especificação (PPM_{total} de 57.903).

Outro ponto de destaque, é que na linha de produção da empresa não existia esta operação de retificação final e não havia parâmetros de processos definidos para retificar anéis de aço inoxidável martensítico nitretado e com revestimento de nitreto de cromo.

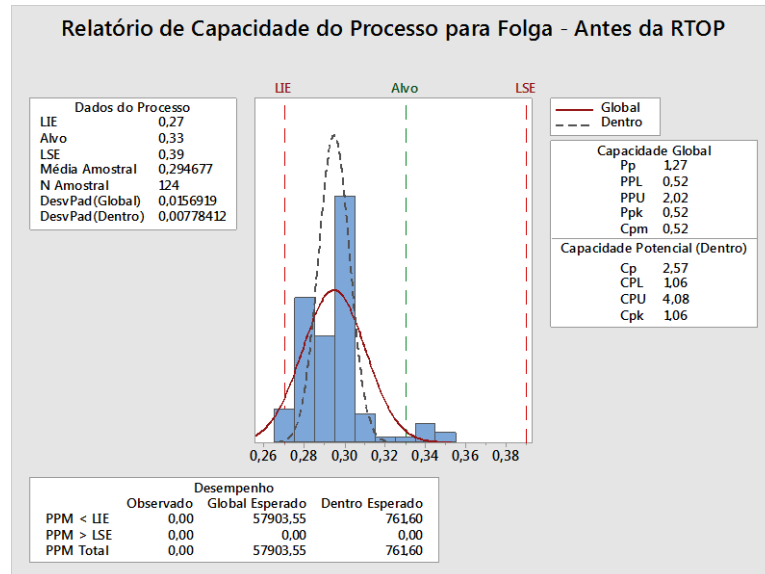


Figura 35 - Índices de capacidade antes da operação de retificação de topo (RTOP)

Na Figura 36 é mostrado o estudo de capacidade do processo após a operação de retificação com os parâmetros otimizados. Observou-se que a média do processo foi deslocada para muito próximo do alvo (0,328145 mm), bem como a amplitude da curva gaussiana diminuiu, ou seja houve uma redução na dispersão dos valores medidos da dimensão da folga, apresentando um novo desvio-padrão de 0,0041057 mm. Assim, os índices de capacidade ficaram todos elevados, demonstrando que o processo está centrado no alvo e com baixa variabilidade, ou seja, com probabilidade praticamente zero de produzir peças fora da especificação ou com defeito ($PPM_{total}=0$).

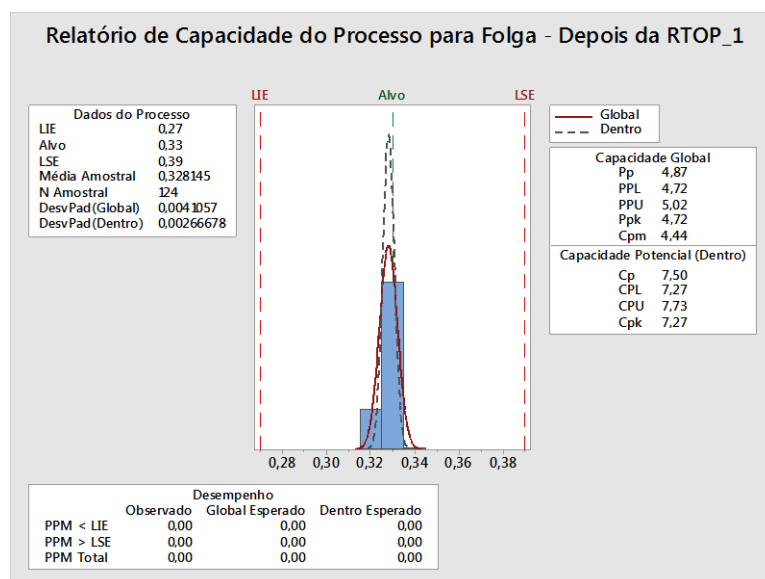


Figura 36 - Índices de capacidade depois da operação de retificação

Na Figura 37 é mostrada uma análise comparativa do processo antes e depois da operação de retificação de topo, em que observa-se claramente que houve uma redução do desvio padrão do processo e uma melhor centralização dos valores de folga em relação ao alvo, após a operação de retificação com os parâmetros otimizados. É possível também verificar o aumento de estabilidade do processo, através dos altos índices de capacidade. E por fim pode-se observar que o percentual de peças fora da especificação foi reduzido de 5,79% para 0,00%.

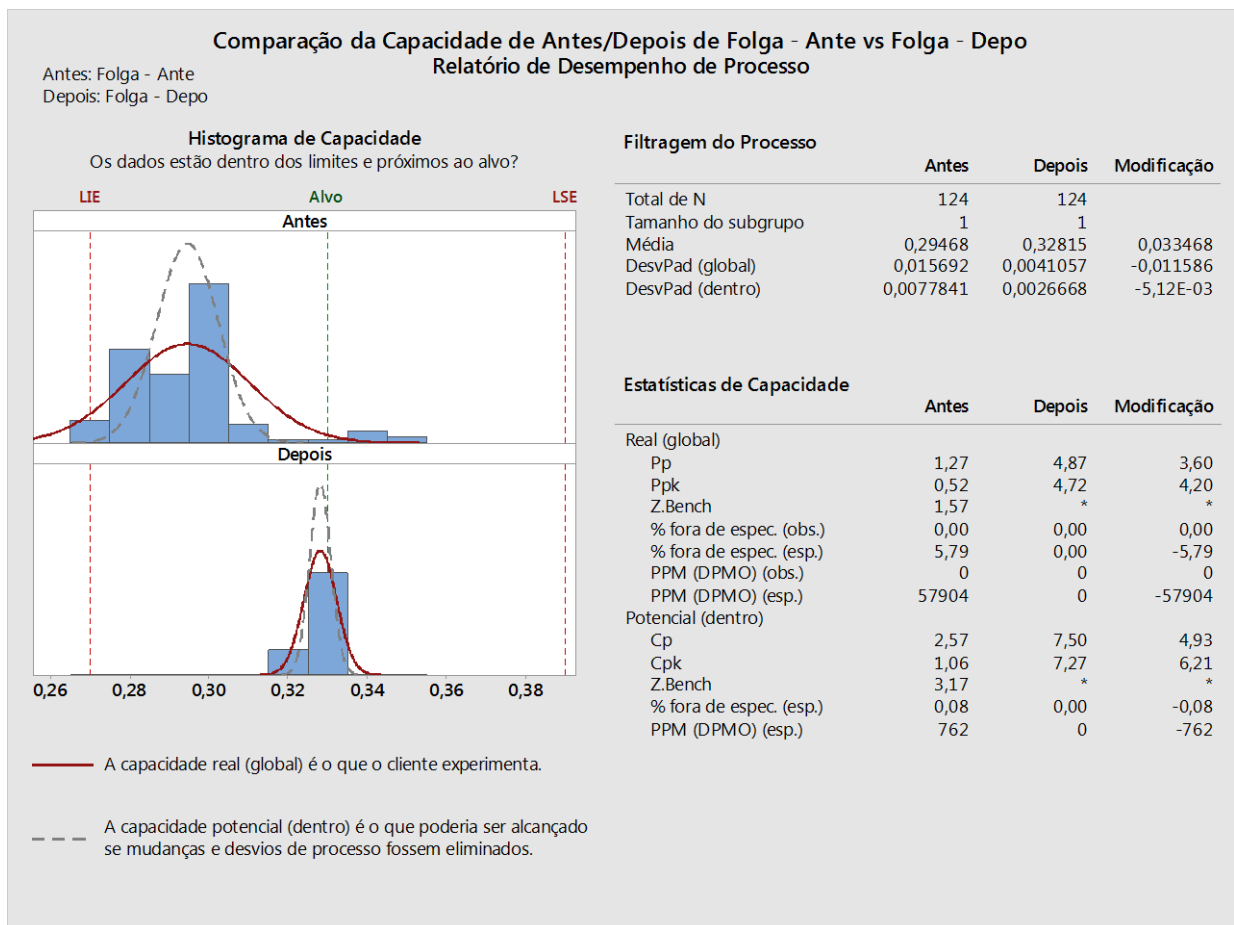


Figura 37 - Análise de capacidade antes e depois da retificação

Finalizando este trabalho, vale salientar que a análise de capacidade comparativa antes e depois do processo de retificação do *gap* das pontas dos anéis de pistão foi de grande valia para empresa, mostrando a importância desta operação de usinagem para garantir a qualidade de fabricação desta linha de produção.

5. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos no processo de retificação de anéis de pistão de aço inoxidável martensítico nitretado e com revestimento de nitreto de cromo, pode-se concluir que:

- Os maiores valores de rotação do rebolo contribuíram significativamente para alcançar a dimensão média de folga entre pontas (0,33 mm) e reduzir a variabilidade.
- O avanço de usinagem foi o fator de maior influência na dimensão da folga entre pontas. Quanto menor o avanço maior a precisão e a estabilidade dimensional desta resposta;
- O rebolo com menor granulometria apresentou o melhor resultado em termos de estabilidade e controle dimensional da peça.
- Os parâmetros ótimos obtidos e disponíveis na máquina são: rotação de 5200 RPM, avanço de 9 GPM e rebolo com granulometria B46. Estes parâmetros foram eficientes na otimização do processo e possibilitaram atingir a dimensão média de folga entre pontas muito próximo do alvo de 0,33 mm.
- Ao avaliar estatisticamente os dados dimensionais antes e após a retificação, observou-se que houve uma redução na dispersão dos valores da folga, com os desvios-padrão caindo de 0,015692 para 0,0041057 mm. O percentual de peças fora da especificação foi reduzido de 5,79 % para 0,00%, possibilitando a redução de custo com refugo (*scrap*).
- Após a retificação com os parâmetros otimizados houve uma melhor centralização dos valores de folga em relação ao alvo. Assim, os índices de capacidade ficaram elevados e com baixa probabilidade de produzir peças fora de especificação ou com defeito;
- Vale ressaltar que mesmo com os resultados obtidos, não se pode concluir que os mesmos parâmetros sejam adequados para a retificação de folga entre pontas para diferentes tipos de materiais e coberturas de anéis de pistão.

Perspectivas

Para trabalhos futuros, têm-se outros aspectos que podem ser considerados para aperfeiçoar o método, propor novas melhorias ou verificar suas limitações, como por exemplo:

- 1 – Testar outros tipos e tamanho de grãos abrasivos;
- 2 – Os parâmetros podem ser explorados em outros níveis além dos testados;
- 3 – Outros métodos de otimização podem ser aplicados ao processo de retificação;
- 4 – Aplicar esta metodologia em outros tipos de anéis de pistão.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C. S. Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada. 2005. 167 f. Dissertação - **Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia**, 2005.
- ANDERS, A. Approaches to rid cathodic arc plasmas of macro and nanoparticles: A review. **Surface and Coatings Technology**, v. 120–121, p. 319–330, 1999.
- ARAUJO, J. A. *et al.* Thick CrN/NbN multilayer coating deposited by cathodic arc technique. **Materials Research**, v. 20, n. 1, p. 200–209, 2017.
- BARÉNYI, I. *et al.* Material and technological aspects while processing of selected ultra high strength steel. **Manufacturing Technology**, v. 19, n. 2, p. 184–189, 2019.
- BERGADO, D. T. *et al.* Microstructures within and outside the smear zones for soft clay improvement using PVD only, Vacuum-PVD, Thermo-PVD and Thermo-Vacuum-PVD. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 6, p. 828–843, 2020.
- BOX, G. E. P.; DRAPPER, N. R. Empirical Model-Building and Response Surfaces. **Hoboken: John Wiley & Sons**, p. 650, 1987.
- Branca Flor Benke de Azevedo, **Docplayer**, 2017. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9902446-Retificar-significa-corriger-irregularidades-de-superficies-de-pecas-assim-a-retificacao-tem-por-objetivo.html>>, acesso em: 10.03.2022.
- BRYSKIN, B. *et al.* Innovative processing technology of chromium carbide coating to apprise performance of piston rings. **International Journal of Materials and Manufacturing**, v. 6, n. 2, p. 131–134, 2013.
- BUJ-CORRAL, I.; ÁLVAREZ-FLÓREZ, J.; DOMÍNGUEZ-FERNÁNDEZ, A. Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes. **Metals**, v. 9, n. 8, p. 1–15, 2019.
- CHANG, T. C.; WANG, K. J.; CHEN, K. S. Capability performance analysis for processes with multiple characteristics using accuracy and precision. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 228, n. 5, p. 766–776, 2014.
- CHEN. X; ROWE B. W. “Analysis and Simulation of Grinding Process”. **International Journal of Machining Tools and Manufacturing**, v. 36, p. 871-906, 1996.
- DAI, J. *et al.* Understanding the effects of grinding speed and undeformed chip thickness on the chip formation in high-speed grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 5–8, p. 995–1005, 2015.

DANTAS J. P. R. T. Enrolamento e corte de anéis de aço: otimização do processo. **Universidade de Coimbra**, departamento de engenharia mecânica, Portugal, 2015.

DELERYD, M. The effect of skewness on estimates of some process capability indices. **International Journal of Applied Quality Management**, v. 2, n. 2, p. 153–186, 1999.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 9ª ed. São Paulo: **Artlibler Editora**, 2014.

DING, R.; LIN, D. K. J.; WEI, D. Dual-Response Surface Optimization: A Weighted MSE Approach. **Quality Engineering**, v. 16, n. 3, p. 377–385, 2004.

DOS ANJOS, M. A. Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubrificarrefrigeração. **Universidade Estadual Paulista**, p. 1–117, 2016.

FU, H.; CHAI, J. Performance of a winged PVD (WPVD) for vacuum consolidation of soft clayey deposits. **Transportation Geotechnics**, v. 24, p. 100370, 2020.

GASAGARA, A.; JIN, W.; UWIMBABAZI, A. Modeling of Vibration Condition in Flat Surface Grinding Process. **Shock and Vibration**, v. 2020, p. 1–12, 2020.

GRAF, W. Cylindrical Grinding. **Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG**, Suíça, p. 991-1003, 2004.

Grinding Wheel, **Abrasiflex**, 2022. Disponível em: <<https://abrasiflex.com.au/product/grinding-wheels/>>, acesso em: 06.03.2022.

Grains of fused aluminium oxide, silicon carbide and other abrasive materials for bonded abrasives and for general applications Microgrits F 230 to F 2000, **FEPA-Standard**, 2006. Disponível em: <<https://www.normadoc.com/english/fepa-standard-42-2-2006-1837190.html>>, acesso em: 10.03.2022.

GÜNAY, E. *et al.* An Investigation on Process Capability Analysis for Fused Filament Fabrication. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 21, n. 4, p. 759–774, 2019.

HASHEMI, H. *et al.* Recent developments on computer aided fixture design: Case based reasoning approaches. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2014, 2014.

HILLIER, F.; LIEBERMAN, G. Introdução á pesquisa operacional. 9 ed. São Paulo: **McGraw Hill**, 2th ed. 2006.

ISO 6621-5:2005, Internal combustion engines - Piston rings - Part 5: Quality requirements. Disponível em: < <https://www.iso.org/standard/40891.html>>, acesso em: 08.03.2022.

ITO, A. *et al.* A study on measurement of conformability of the piston oil ring on the cylinder bore under engine operating condition by laser induced fluorescence method using optical fiber. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 136, n. 12, p. 1–8, 2014.

KING, R. I.; HAHN, R. S. Handbook of Modern Grinding Technology. **Chapman and Hall Advanced Industrial Technology Series**, New York, 1986.

KLEIJNEN, J. P. C. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 164, n. 2, p. 287–300, 2005.

KLOCKE F.; FRIEDRICH D.; LINKE B.; NACHMANI Z. Basics for in-process roundness error improvement by a functional workrest blade. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 1, p. 275–280, 2004.

KLOCKE, F.; BARTH, S.; MATTFELD, P. High Performance Grinding. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 266–271, 2016.

KONIG, W. Tecnologia de fabricação: retificação, brunimento e lapidação. Tradução Weingaertner, W. L. VDI Verlag, Dusseldorf, Alemanha 1980.

LABIDI, A. *et al.* Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 18, n. 4, p. 1017–1033, 2018.

LEONESIO, M.; BIANCHI, G.; CAU, N. Design criteria for grinding machine dynamic stability. **Procedia CIRP**, v. 78, p. 382–387, 2018.

LIN, J. *et al.* Development and evaluation of low friction TiSiCN nanocomposite coatings for piston ring applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 298, p. 121–131, 2016.

MALKIN, S.; GUO, C. Grinding Technology: Theory and applications of machining with abrasives, 2 ed., **Industrial Press**, 2008.

MAHSHID, R.; MANSOURVAR, Z.; HANSEN, H. N. Tolerance analysis in manufacturing using process capability ratio with measurement uncertainty. **Precision Engineering**, v. 52, p. 201–210, 2018.

MAITY, S. R.; CHAKRABORTY, S. Grinding wheel abrasive material selection using fuzzy TOPSIS method. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 28, n. 4, p. 408–417, 2013.

MARATHE, A. V.; VENKATACHALAM, G.; MARATHE, N. V. Cylinder Head Bolt Tightening Strategies in Case of Multi-Cylinder Engines and Its Effect on Gasket Sealing Performance, Bore Deformation and Piston Ring Conformability. **Australian Journal of Mechanical Engineering**, v. 18, n. 3, p. 303–321, 2018.

MARINESCU, I. D. *et al.* I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**, 2nd ed., CRC Press, 2016.

Moldes injeção. Disponível em: <<http://moldesinjecaoplasticos.com.br/limpeza-revestimento-cvd-pvd-texturizacao/>>, acesso em: 26.03.2022.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros, 6 ed., Rio de Janeiro: **LTC**, 2016.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments, 8^a ed, **Hoboken: John Wiley & Sons**, p. 752, 2013.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, 4^a ed, *Hoboken: John Wiley & Sons*, p. 856, 2016.

NADOLNY, K. Wear phenomena of grinding wheels with sol–gel alumina abrasive grains and glass–ceramic vitrified bond during internal cylindrical traverse grinding of 100Cr6 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 1–4, p. 83–98, 2015.

NGUYEN, T.; ZHANG, L. C. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 140, p. 224–230, 2003.

NIE, Z. *et al.* A Statistical Model of Equivalent Grinding Heat Source Based on Random Distributed Grains. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 140, n. 5, 2018.

NIST, 2004, disponível em <<https://www.nist.gov/fusion-search?s=CCF>>, acesso em: 11.03.2022.

NIVRITHI, B. *et al.* Process improvement through capability analysis: A case study in an engine valve manufacturing company. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 16, n. 3, p. 244–268, 2013.

Norma Brasileira, Ferramentas abrasivas – Uso, manuseio, segurança, classificação e padronização, **ABNT NBR 15230**, 2016. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/24481/abnt-nbr15230-ferramentas-abrasivas-uso-manuseio-seguranca-classificacao-e-padronizacao>>, acesso em: 06.03.22.

Norma Brasileira, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, **ABNT NBR 8800**, 2008. Disponível em: <https://engcivil20142.files.wordpress.com/2018/03/nbr8800_2008_1.pdf>, acesso em: 06.03.22.

OGUNBIYI, O. *et al.* Optimization of spark plasma sintering parameters of inconel 738LC alloy using response surface methodology (RSM). **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 3, n. 2, p. 177–188, 2020.

OLIVEIRA, J. B. *et al.* Análise Da Capacidade De Um Processo: Um Estudo De Caso Baseado Nos Indicadores Cp E Cpk. **Encontro Nacional De Engenharia De Producao**, v. 31, p. 15, 2011.

PARODY, A. *et al.* Application of a central design composed of surface of response for the determination of the flatness in the steel sheets of a Colombian steel. **Springer International Publishing**, p. 739–747, 2018.

PATIL, S. S. *et al.* A Review on Influence of Various Technological Processes on Mechanical Properties of Aluminum Alloys. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 376, n. 1, 2018.

PATTNAIK, S.; JHA, P. K.; KARUNAKAR, D. B. A review of rapid prototyping integrated investment casting processes. **Journal of Materials: Design and Applications**, v. 228, n. 4, p. 249–277, 2014.

PEARN, W. L.; CHEN, K. S. Capability indices for non-normal distributions with an application in electrolytic capacitor manufacturing. **Microelectronics Reliability**, v. 37, n. 12, p. 1853–1858, 1997.

PEI, Z. J.; XIN, X. J.; LIU, W. Finite element analysis for grinding of wire-sawn silicon wafers: A designed experiment. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 1, p. 7–16, 2003.

PICCILLI, M. R. *et al.* Crack avoidance in steel piston rings through the optimization of process and gas nitriding parameters. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1–4, p. 397–409, 2011.

RESHETNIKOVA, E.; BOCHKAREV, P.; NAZARYEV, A. Generation the efficient measuring instruments kit in the computer - Aided preproduction planning's system for multiproduct machine manufactory. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 709, n. 3, 2020.

Rheinmetall. Disponível em: <<https://www.ms-motorservice.com.br/tecnipedia/post/folga-entre-as-extremidades-do-anel-de-pistao>>, acesso em: 26.03.2022.

ROSSNAGEL, S. M.; CUOMO, J. J.; WESTWOOD, W. D. **Handbook of Plasma Processing Technology**, Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1990.

ROWE, W. B. Principles of modern grinding technology, 2nd ed, Oxford: **Elsevier Inc**, 2014.

SCHWEIZER, S.; FUESSER, H.-J. Ein neuer, realitätsnaher Modelltest für Verschleißuntersuchungen an Kolbenringen und Zylinderlaufflächen von Verbrennungsmotoren. **Fahrzeugtechnik**, p. 1–12, 2013.

Serra metal. Disponível em <<https://serrametal.com.br/processos-superficiais-nitretacao/>>, acesso em: 23.03.2022.

SHIH, A. J. *et al.* High speed and high material removal rate grinding of ceramics using the vitreous bond CBN wheel. **Machining Science and Technology**, v. 24, p. 43–58, 1999.

TORRES, A. F. *et al.* Impact of stochastic industrial variables on the cost optimization of AISI 52100 hardened-steel turning process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 9–12, p. 4331–4340, 2019.

STEMMER, C. E. Ferramentas de Corte I, 7ed., Florianópolis: **Editora da Ufsc**, p. 249, 2007.

TAWAKOLI, T.; BARRETT, C. G. High-Efficiency Deep Grinding: Technology. **Process Planning and Economic**, 1 ed., 1993.

TYAGI, A. *et al.* Tribological behavior of carbon coating for piston ring applications using Taguchi approach. **Materials Today: Proceedings**, v. 25, n. 6, p. 759–764, 2019.

WERKEMA, M. C. C, AGUIAR, S. Planejamento e Análise de Experimentos: Como identificar as Principais Variáveis Influentes em um Processo. **Ed. Werkema**, Belo Horizonte, 1996.

WÖLFLE, P. *et al.* The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts - A new model test. **Tribology International**, v. 94, p. 306–314, 2016.

WU, F. C. Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function. **Quality Engineering**, v. 17, n. 1, p. 119–126, 2005.

YU, T.; BASTAWROS, A. F.; CHANDRA, A. Experimental and modeling characterization of wear and life expectancy of electroplated CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 121, p. 70–80, 2017.

ZHANG, Y. *et al.* Modeling and optimization of alloy steel 20CrMnTi grinding process parameters based on experiment investigation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 1859–1873, 2018.

ZHANG, Y. *et al.* Modeling and simulation of the distribution of undeformed chip thicknesses in surface grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 127, p. 14–27, 2018.

ZHOU, W.; TANG, J.; SHAO, W. Study on surface generation mechanism and roughness distribution in gear profile grinding. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 187, p. 105921, 2020.

ZHOU, X; JIANG, P; WANG, Y. Sensitivity analysis-based dynamic process capability evaluation for small batch production runs. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 10, p. 1855–1869, 2016.