

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA NA  
RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ ) DA LUVA EXTERNA PARA *CARDAN*

por

Cristiano Vargas Macedo

Monografia desenvolvida para obtenção do Título de  
Especialista em Engenharia Mecânica

Porto Alegre, dezembro de 2012

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA NA  
RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ ) DA LUVA EXTERNA PARA *CARDAN*

por

Cristiano Vargas Macedo

Monografia submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Especialista em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Porto Alegre, dezembro de 2012

## RESUMO

O processo de usinagem por retificação é um dos processos mais utilizados na indústria para a confecção de componentes que exigem um alto grau de acabamento, tolerâncias geométricas e/ou superficiais restritas, pois consegue, na maior parte dos casos, atendê-los mesmo trabalhando com altas taxas de remoção de material. Atualmente, é difícil de encontrar alguma geometria que não possa ser usinada através do processo de retificação, e isto se deve à grande evolução das máquinas e equipamentos. Possui como vantagens alta produtividade e alta precisão. Suas desvantagens estão ligadas a uma necessidade de mão de obra especializada por se tratar de máquinas-ferramentas complexas com alto investimento inicial (não somente a máquina, mas também as ferramentas necessárias ao processo possuem um alto custo quando se compara com as de aresta de corte com geometria definida). Portanto, faz-se necessário identificar quais são as variáveis que influenciam os aperfeiçoamentos de um processo de retificação, uma vez que o número de variáveis envolvidas neste ciclo são muitas e são poucos os estudos que avaliam de maneira estatística as relações dos parâmetros de corte com os resultados desejados. Desta forma, foi realizado um projeto de experimentos fatorial para determinar a influência de alguns parâmetros de corte no acabamento superficial gerado por retificação. O processo de retificação cilíndrica por mergulho de uma luva externa de *cardan* de aço SAE1141, temperada e revenida, com dureza superficial média de 50 HRC, foi executado a fim de transformar um processo instável em um processo capaz quanto ao seu desempenho. Um software estatístico foi utilizado para auxiliar na construção dos gráficos e tabelas analisadas. A principal conclusão alcançada foi que a velocidade de avanço de dressagem é o fator que mais influencia, dentre os estudados, na rugosidade média da peça.

**Palavras-chave:** processo de retificação; projeto fatorial de experimentos; controle estatístico do processo; rugosidade superficial.

## ABSTRACT

The machining process of grinding is a process commonly used in the industry for the manufacture of components which require a high degree of finish geometric tolerances and/or surface finishing, because in most cases it can achieve these characteristics with high rates of material removal. Currently, it is difficult to find any geometry that cannot be machined by the grinding process that is because of the great development of machinery and equipment technology. It has advantages such as high productivity and high precision. Its disadvantages are linked to a need for skilled labor since the machines are complex and have a high initial investment (not only the machine but also the tools needed for the process have a high cost when compared to the cutting edge with defined geometry). Therefore, it is necessary to identify what are the variables that influence the improvements of a grinding process. There are a high number of variables involved in this process and only few studies that assess the relationship of statistical way of cutting parameters with the desired results. Thus, we performed a factorial design of experiments to determine the influence of some cutting parameters on the surface finish generated by rectification. The process of plunging cylindrical grinding of a driveshaft sleeve yoke of SAE1141 steel, quenched and tempered, with hardness of 50 HRC average, was used as the object of study in order to transform an unstable process in a capable process with stable performance. Statistical software was used to assist in the construction of graphs and tables analyzed. The main conclusion reached was that the feeding speed of dressing is the main factor of influence, among those studied, on the average roughness of the part.

**Keywords:** grinding process; factorial design of experiments, statistical process control, surface roughness.

## INDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	6
2.1 Objetivo Geral .....	6
2.2 Objetivos Específicos .....	6
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	7
3.1 Processo de Retificação .....	7
3.1.1 Rebolo .....	8
3.1.2 Distribuição de Energia no Corte .....	10
3.1.3 Desgaste do Grão Abrasivo .....	11
3.1.4 Dressagem do Rebolo.....	12
3.2 Acabamento Superficial .....	13
3.2.1 Critérios para Avaliar a Rugosidade.....	15
3.3 Efeitos dos Parâmetros de Corte na Rugosidade .....	17
3.4 Análises Estatísticas do Processo .....	18
3.4.1 Variação: Causas Comuns e Especiais .....	18
3.4.2 Interpretação da Capabilidade do Processo conforme Manual do CEP - AIAG .....	20
3.4.3 Definição dos Índices de Capabilidade e Desempenho do Processo.....	20
3.4.4 Índice PPM (Partes Por Milhão).....	22
3.4.5 Projeto de Experimentos .....	22
3.4.6 Experimento Fatorial.....	24
3.5 Conclusão Teórica.....	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
4.1 Corpo de Prova.....	29
4.2 Ferramenta de Corte .....	30
4.3 Máquina Ferramenta.....	31
4.4 Planejamento Experimental.....	31
4.4.1 Escolha dos Fatores e Níveis.....	31
4.4.2 Escolha do Projeto de Experimentos .....	35
4.4.3 Montagem do Experimento .....	36
4.4.4 Realização do Experimento.....	36
4.4.5 Medição da Rugosidade .....	38
5. RESULTADOS.....	39
5.1 Coleta dos Valores de Rugosidade .....	39
5.2 Análise dos Dados e Interpretação dos Resultados do Experimento.....	39
5.3 Testando as Variáveis.....	44
6. CONCLUSÕES .....	46
7. REFERÊNCIAS.....	47
7.1 Citadas .....	47
7.2 Consultadas .....	48

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de aplicação do eixo <i>cardan</i> .....	1
Figura 1.2. Eixo <i>cardan</i> dianteiro .....	2
Figura 1.3. Eixo <i>cardan</i> traseiro .....	2
Figura 1.4. Luva de <i>cardan</i> : (a) interna; (b) externa .....	3
Figura 1.5. Estudo de capacidade para a característica atual de rugosidade do diâmetro externo da luva retificada em $R_a$ .....	4
Figura 1.6. Valores individuais de rugosidade em um período de três dressagens do rebolo .....	5
Figura 3.1. Sequência de formação do cavaco na retificação.....	7
Figura 3.2. Elementos de retificação .....	8
Figura 3.3. Identificação de rebolos convencionais .....	8
Figura 3.4. Identificação para rebolos com abrasivos de diamante ou CBN .....	9
Figura 3.5. Distribuição de energia no gume do grão abrasivo, na peça e no meio e na retificação.....	10
Figura 3.6. Fluxo de dissipação do calor gerado na retificação de material cerâmico .....	11
Figura 3.7. Mecanismo de desgaste do grão abrasivo .....	11
Figura 3.8. Esquema de dressagem do rebolo .....	13
Figura 3.9. Ilustração de textura superficial de acordo com a norma ANSI .....	14
Figura 3.10. Sistema da linha média .....	15
Figura 3.11. Representação gráfica do <i>cut-off</i> .....	16
Figura 3.12. Representação gráfica do parâmetro de rugosidade $R_a$ .....	17
Figura 3.13. Representação das diferentes distribuições.....	19
Figura 3.14. Representação da presença de causas comuns, formando uma distribuição estável.....	19
Figura 3.15. Representação da presença de causas especiais, resultando em um processo que não é estável ao longo do tempo .....	19
Figura 3.16. Representação do modelo de um processo .....	23
Figura 3.17. Exemplo de gráfico dos efeitos principais .....	25
Figura 3.18. Gráfico de interações entre fatores .....	27
Figura 3.19. Exemplo de gráfico de interações entre fatores .....	27
Figura 3.20. Exemplo de Gráfico de Pareto dos efeitos padrões.....	28
Figura 4.1. Ferramenta de corte (rebolo) utilizada nos experimentos .....	30
Figura 4.2. Dressador tipo fliesen usado nos ensaios: (a) vista lateral; (b) vista superior .....	30
Figura 4.3. Retificadora Zema utilizada nos experimentos.....	31
Figura 4.4. Diagrama de Ishikawa .....	32
Figura 4.5. Tabela de projetos fatoriais em relação à resolução por Software Minitab 14.1. ....	35
Figura 4.6. <i>Session</i> com as combinações de fatores.....	36
Figura 4.7. Valores para o experimento .....	37
Figura 4.8. Pinça de rampa: (a) dispositivo completo; (b) detalhe do dispositivo .....	37

Figura 4.9. Luva externa retificada: (a) região retificada; (b) detalhe da superfície usinada. ....	38
Figura 4.10. Vista superior da máquina durante o processo de retificação. ....	38
Figura 4.11. Sistema de medição: (a) rugosímetro Taylor Hobson; (b) procedimento de medição de rugosidade; (c) representação do apalpador convergindo para o centro da peça. ....	39
Figura 5.1. Gráficos dos efeitos principais para a resposta $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] .....	42
Figura 5.2. Gráfico de efeito das interações para $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] .....	42
Figura 5.3. Gráfico de Pareto dos efeitos para $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ].....	43
Figura 5.4. Estudo de capacidade para a característica de rugosidade do diâmetro externo da luva retificada após parâmetros alterados via Minitab.....	44
Figura 5.5. Valores individuais de rugosidade em um período de três dressagens do rebolo .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Relação de valores de <i>cut-off</i> com os de rugosidade $R_a$ .....	17
Tabela 3.2. Constante $d_2$ em função do tamanho de amostra .....	21
Tabela 4.1. Composição química do Aço SAE 1141 .....	29
Tabela 4.2. Propriedades mecânicas do aço SAE1141 .....	29
Tabela 4.3. Parâmetros escolhidos para o estudo .....	32
Tabela 4.4. Dados para os cálculos dos valores teóricos.....	33
Tabela 4.5. Tabela de fatores e níveis .....	35
Tabela 5.1. Valores de rugosidade média ( $R_a$ ) .....	40
Tabela 5.2. Valores dos efeitos principais para $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] .....	41
Tabela 5.3. Efeitos das interações de vSd com os demais fatores principais .....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área superficial de impressão, na medição de dureza Knoop
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio cristalino
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> – Instituto Nacional Americano de Padronização
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Associação Americana para materiais e testes
B <sub>4</sub> C	Carboneto de Boro
Bd	Largura do dressador [mm]
Bs	Largura do rebolo [mm]
Bw	Largura da zona retificada [mm]
C	Número de grãos por unidade de área [1/mm <sup>2</sup> ]
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> – Controle numérico computadorizado
C <sub>p</sub>	Fator de correção relacionado ao formato do penetrador, na medição de dureza Knoop
De	Diâmetro equivalente [mm]
DIN	<i>Deutsches institut für Normung</i> – Instituto Alemão para Normalização
Ds	Diâmetro do rebolo [mm]
Dw	Diâmetro da peça [mm]
e <sub>c</sub>	Energia de corte específica [J/mm <sup>3</sup> ]
fa	Avanço para acabamento [mm/volta]
fd	Avanço para desbaste [mm/volta]
FEPA	Federação Europeia dos Fabricantes de Abrasivos
FIS	<i>Field Instrumentation System</i> – Sistema de instrumentação de campo
F <sub>ns</sub>	Força normal de corte
fs	Avanço para semiacabamento [mm/volta]
F <sub>ts</sub>	Força tangencial de corte
gdl	Graus de liberdade
HB	Dureza na escala Brinell
h <sub>cu</sub>	Espessura média do cavaco [mm]
HK	Dureza na escala Knoop
HRC	Dureza na escala Rockwell C
ISO	<i>International Organization of Standardization</i> – Organização Internacional para Padronização
JIS	<i>Japanese Standards Association</i> – Associação Japonesa de Padronizações
K	Número de fatores de um experimento
L	Comprimento da impressão, na medição de dureza Knoop

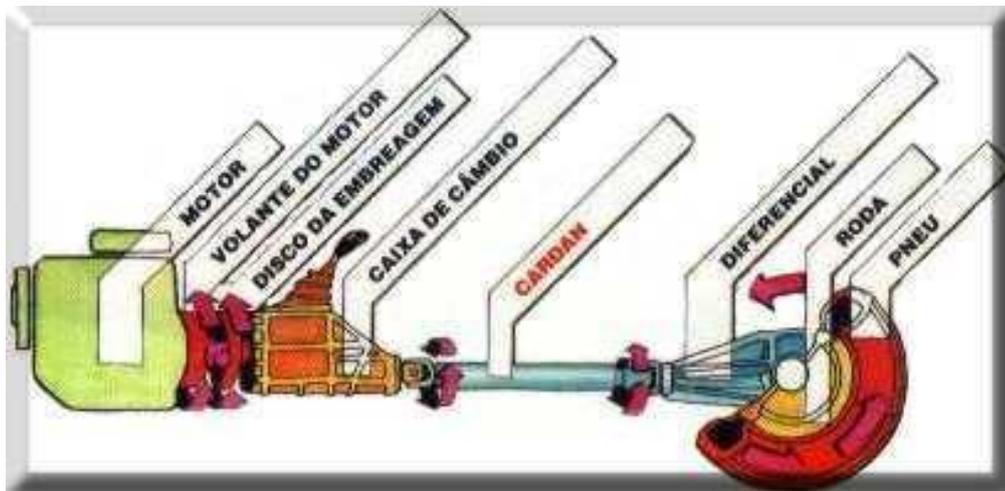
$l_e$	<i>Cut-off</i> – Comprimento de amostragem
$l_m$	Comprimento do percurso de medição
$l_n$	Comprimento para a parada do apalpador
$l_t$	Comprimento total de medição
$l_v$	Comprimento para atingir a velocidade de medição
NBR	Norma brasileira
$N_s$	Rotação do rebolo [rpm]
$N_w$	Rotação da peça [rpm]
P	Carga aplicada para medição de dureza Knoop ou número de fatores designados para as interações ou Potência [Kw]
$Q_s$	Relação de velocidade entre o rebolo e a peça [adimensional]
$Q_w'$	Taxa de remoção de material específica [ $\text{mm}^3/\text{min}/\text{mm}$ ]
R	Resolução do projeto
$R_a$	Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> – Sociedade dos Engenheiros Automotivos.
SiC	Carboneto de Silício
SMA	Sobremetal de acabamento
SMD	Sobremetal de desbaste
SMS	Sobremetal de semiacabamento
$S_p$	Tempo de <i>spark-out</i> – tempo de faiscamento [s]
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i> – Veículo Utilitário Esportivo.
Ud	Grau de recobrimento [ $\text{mm}^2/\text{volta}$ ]
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> – Associação Alemã de Engenharia
VS	Velocidade de corte do rebolo [m/s]
vfa	Velocidade de avanço para acabamento [mm/min]
vfd	Velocidade de avanço para desbaste [mm/min]
vfs	Velocidade de avanço para semiacabamento [mm/min]
vSd	Velocidade de avanço para dressagem [mm/min]

## 1. INTRODUÇÃO

O eixo *cardan* forma um conjunto de componentes mecânicos que tem a função de transmitir o torque e a rotação produzidos pelo motor para o eixo diferencial (ou tracionado) do veículo, compensando diferenças angulares e de comprimento entre eles por meio de juntas universais.

Durante a utilização do veículo, o eixo *cardan* sofre diversos carregamentos torcionais estáticos e dinâmicos produzidos pelo motor, pela caixa de transmissão, por choques e impactos que são, muitas vezes, causados pelas condições da pista de rolagem, aceleração e frenagem repentinas do veículo.

A Figura 1.1 mostra o eixo *cardan* e os elementos que ficam em suas extremidades.



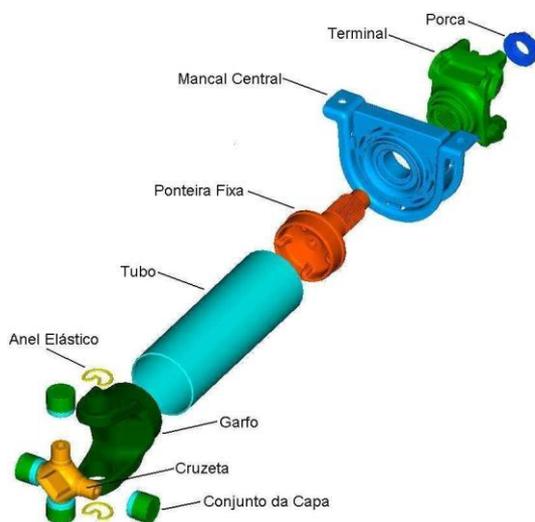
**Figura 1.1.** Esquema de aplicação do eixo *cardan* (Dana, 2008)

A utilização do eixo *cardan* em veículos ocorre desde a criação dos primeiros automóveis, camionetas e caminhões para transmitir o torque do motor ao eixo tracionado (Decker, 1997). Sua utilização é bastante ampla em veículos automotores pesados (ônibus, furgões, caminhões, pás-carregadeiras, motoniveladoras e máquinas agrícolas) e em equipamentos industriais de conformação mecânica. Ela se justifica pelo deslocamento do centro de gravidade desses veículos para os seus eixos traseiros, os quais passam a exercer valores de força significativamente maiores sobre o solo em comparação com os seus eixos dianteiros; isso os torna mais adequados para transmitir tração ao veículo e possibilitar um maior aproveitamento de energia.

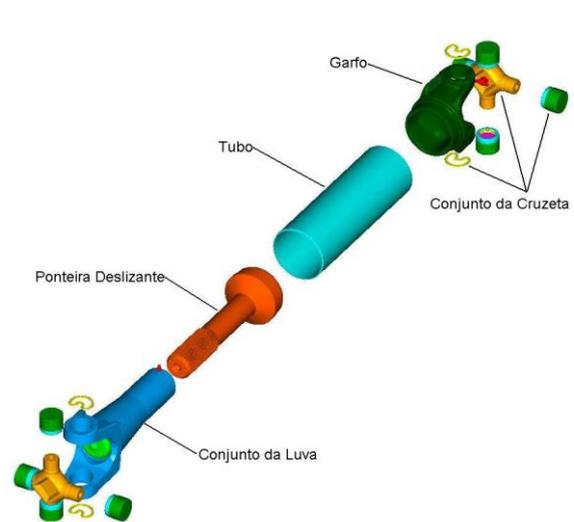
O eixo *cardan* é ainda utilizado em veículos automotores leves de tração traseira e motorização dianteira, como *pick-ups* e utilitários. Contudo, devido à necessidade de o mercado desenvolver veículos mais potentes e confortáveis a baixo custo, a tração traseira nos

veículos automotores leves foi gradativamente substituída pela tração dianteira (motor e eixo tracionado localizados na parte dianteira do veículo). Isto fez com o que o eixo *cardan* fosse substituído pela junta homocinética, que pode ser utilizada para aplicações de tração dianteira, com baixos valores de torque, adequada para a carga que estes veículos carregam e sua própria massa (Sevin, 1979).

O eixo *cardan* admite variadas combinações entre os seus componentes para melhor se adaptar às características dos veículos e aos equipamentos industriais nos quais são utilizados. A Figura 1.2 ilustra uma configuração de um eixo *cardan* dianteiro que liga a caixa de câmbio ao eixo *cardan* traseiro conectado, por sua vez, ao diferencial do veículo. Já a Figura 1.3 mostra uma configuração de eixo *cardan* traseiro.



**Figura 1.2.** Eixo *cardan* dianteiro (Dana, 2012)



**Figura 1.3.** Eixo *cardan* traseiro (Dana, 2012).

Com o constante crescimento do mercado de veículos com tração traseira, principalmente os utilitários como *pick-ups* e SUVs (*Sport Utility Vehicles*), investimentos nas indústrias que suportam este mercado fazem-se necessários para que estas se adaptem as novas demandas de mercado com exigências de qualidade cada vez mais rigorosas.

Contudo, sabe-se que a ampliação do parque fabril na maioria dos casos torna-se inviável financeiramente devido a flutuações na demanda e à competitividade no modelo atual de mercado global. Isto estimula o aperfeiçoamento de processos de fabricação visando aprimorar a eficiência e/ou a produtividade das empresas, mantendo ou melhorando seus índices de qualidade.

Existem vários tipos de máquinas, equipamentos e processos de fabricação por usinagem que podem ser aperfeiçoados. Neste trabalho será abordado o processo de

retificação cilíndrica externa de luvas externa para *cardan*, processo que requer uma máquina ferramenta de alto custo e um elevado tempo de processamento.

A luva é um componente básico de um *cardan* e tem como função a transmissão de torque e/ou movimento. O “corpo” da luva é internamente entalhado que, acoplado com um eixo com entalhes externos, propiciam ao eixo *cardan* variar seu comprimento para compensar os movimentos causados pela suspensão do veículo e também facilita a montagem do eixo ao veículo. Quanto à posição e aplicação da luva existem dois tipos:

- *Luva interna* (Fig. 1.4a). Localiza-se entre os conjuntos extremos de um eixo *cardan*, chamados de juntas universais, para propiciar um deslizamento axial. Trabalha de maneira independente da transmissão, por isso, não necessita de uma superfície tolerada. Seu diâmetro externo não é funcional para o sistema, sendo em alguns casos, torneado, para minimizar os problemas de excentricidade causados pela matéria-prima, que pode ser de aço forjado ou ferro fundido.
- *Luva externa* (Fig. 1.4b). Localiza-se na extremidade do *cardan*, fica acoplada à transmissão ou caixa de câmbio. Possui diâmetro externo retificado, pois como é montada diretamente na saída da transmissão, um sistema de vedação é montado sobre seu corpo. Isso exige que a dimensão e a rugosidade sejam bem controladas. O acoplamento e a função deste componente são críticos para a vida da transmissão.



(a) Luva interna



(b) Luva externa

**Figura 1.4.** Luva de cardan: (a) interna; (b) externa (Dana, 2012).

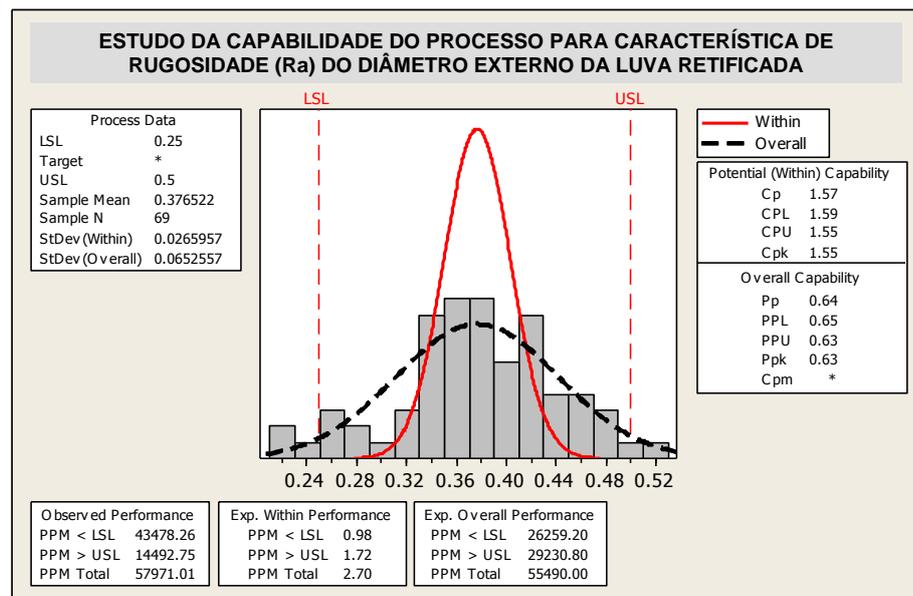
A dificuldade de justificar o investimento em processos de retificação originou a necessidade de aperfeiçoá-lo. E, em virtude da complexidade do mesmo e da escassez de profissionais especializados no mercado de trabalho, faz-se necessário elaborar uma proposta de otimização sem que esta afete a qualidade do produto.

Assim, pretende-se estudar a relação de parâmetros selecionados do processo com o acabamento do diâmetro externo retificado da luva externa de *cardan* através do desenvolvimento de um projeto fatorial de experimentos. O estudo visa demonstrar quais das variáveis de entrada escolhidas possuem influência mais significativa sobre a rugosidade

média da superfície usinada e, com isso, melhorar o desempenho da operação de corte. Ferramentas estatísticas serão utilizadas para auxiliar na tomada de decisões diante de incertezas, justificando cientificamente tais decisões.

Conforme critério da AIAG (*Automotive Industry Action Group* – entidade americana criada por um grupo de profissionais das empresas: Daimler Chrysler, Ford Motor Company e General Motors, com objetivo de contribuir propondo soluções para o desenvolvimento e prosperidade da indústria automotiva americana), tais ferramentas são usadas para obter, apresentar e analisar características ou valores numéricos para uma melhor tomada de decisão em situações de incerteza.

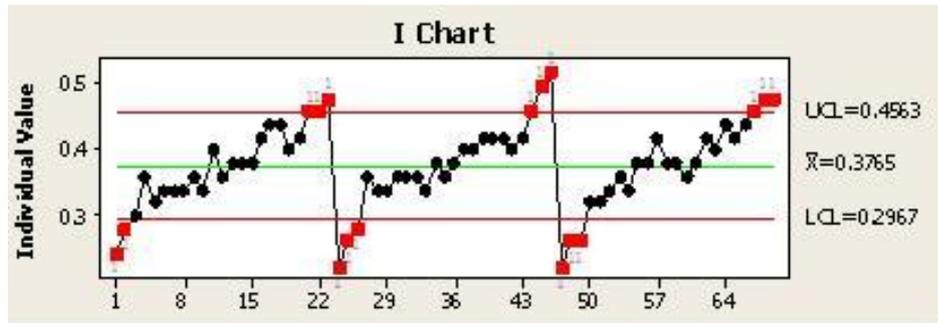
Considerando a avaliação da capacidade do processo de retificação do diâmetro externo da luva externa de *cardan* realizado pela Dana Indústrias Ltda. (local onde o estudo foi realizado), fez-se um estudo de capacidade em função da característica de rugosidade  $R_a$ . Este estudo pode ser representado pela Figura 1.5.



**Figura 1.5.** Estudo de capacidade para a característica atual de rugosidade do diâmetro externo da luva retificada em  $R_a$ .

Analisando o resultado apresentado na Figura 1.5 conforme critério da Dana (2010), a retificadora utilizada não apresenta capacidade para a tolerância de 0,25–0,50  $R_a$ , pois os índices  $Pp$  e  $Ppk$  estão menores que 1,67. Utilizam-se os índices  $Pp$  e  $Ppk$ , que são índices de desempenho do processo, para comparar com os índices de capacidade do processo  $Cp$  e  $Cpk$ , visando à priorização de melhorias no decorrer do tempo.

No processo de retificação da luva externa de *cardan*, a dressagem do rebolo (limpeza superficial do rebolo para recuperação das arestas de corte dos grãos abrasivos) ocorre a cada 23 peças produzidas, conforme pode ser visto na Figura 1.6.



**Figura 1.6.** Valores individuais de rugosidade em um período de três dressagens do rebolo

Ao analisar a Figura 1.6, pôde-se constatar que, após executada a dressagem, o valor encontrado de rugosidade tende ao mínimo ( $0,25 \cdot R_a$ ); tal valor vai aumentando à medida que o desgaste do rebolo aumenta, tendendo ao máximo ( $0,50 \cdot R_a$ ) quando se aproxima da 23<sup>a</sup> peça, depois de realizada a dressagem do rebolo.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência de parâmetros específicos de corte no acabamento superficial e na produtividade da operação de retificação do diâmetro externo de uma luva externa de *cardan*. Para tanto, faz-se necessário elaborar uma proposta de otimização sem que esta afete a qualidade do produto.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Estruturar um trabalho que assista no desenvolvimento e na análise de um processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em uma peça forjada em aço SAE 1141 temperada por indução e revenida, com dureza superficial média de 50 HRC.
- Analisar a influência de certas variáveis de entrada do processo de retificação (avanços de desbastes, semiacabamento e acabamento; quantidade de sobremetal a ser removido; tempo de faiscamento; velocidade de avanço de dressagem) sobre a rugosidade média ( $R_a$ ) do diâmetro externo da luva externa de *cardan*.
- Aplicar ferramentas estatísticas na análise do processo no estado atual, para servir como referência à comparação com o estado futuro (otimizado) e também poder validar a influência dos parâmetros otimizados no processo.
- Avaliar os resultados obtidos de maneira a montar um cenário que promova a melhor condição de usinagem, alinhada com a qualidade do produto e a condição econômica. Busca-se reduzir a frequência de dressagem do rebolo e a dispersão do processo e também manter a centralização do mesmo, almejando um desempenho de processo com índices de  $Pp$  e  $Ppk$  superiores a 1,67.

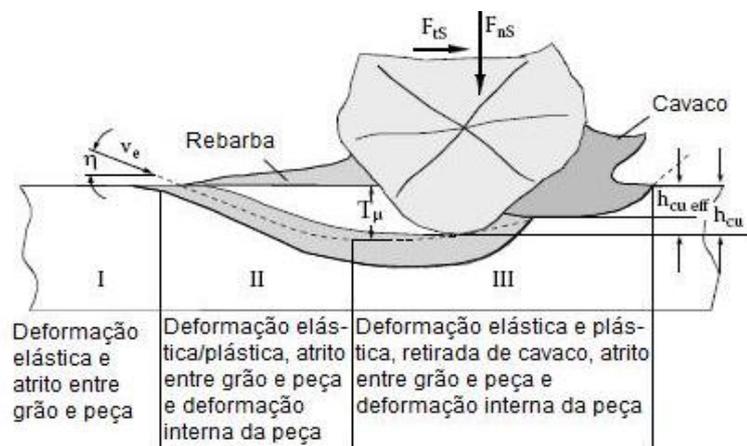
### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Processo de Retificação

Retificação é um processo de remoção de material por abrasão.

Abrasão (do latim *abradere*) é definida por Nussbaum (1988 v.1) como a operação de arrancar partículas de um material por “esfregamento” contra outro material que será, quase sempre, mais duro do que o primeiro.

De acordo com König (1980), no processo de retificação, os grãos abrasivos passam pela peça-obra (denominação da peça a ser usinada) em uma trajetória definida e retiram materiais, sob a forma de cavacos, gerando calor por um forte atrito e deformações elástico-plásticas na zona afetada. De acordo com a Figura 3.1, a força de usinagem, que atua sobre a aresta de corte (gume) e sobre a peça durante a fase de ação do rebolo, pode ser subdividida em duas componentes: a força tangencial ( $F_{tS}$ ) no sentido do corte e uma componente normal ( $F_{nS}$ ) à  $F_{tS}$ . O quociente  $F_{nS}/F_{tS}$  é denominado relação de força de usinagem. Além disso,  $h_{cu}$  é a profundidade de usinagem e  $h_{cu\text{ eff}}$  é a espessura média do cavaco.



**Figura 3.1.** Sequência de formação do cavaco na retificação (Marinescu *et al.*, 2007).

O processo de retificação pode ser caracterizado por diferentes grandezas como as componentes da força de usinagem, a vida do rebolo (desgaste do grão abrasivo) e a temperatura. O resultado do processo deve ser avaliado em função da qualidade da superfície retificada e de aspectos econômicos (custo de fabricação), os quais estão diretamente ligados à variável velocidade de remoção.

As aplicações do processo de retificação são diversas. Dentre elas destacam-se a usinagem de peças endurecidas com alta precisão e alta taxa de remoção de material (Nussbaum, 1980, v.1).

Conforme Marinescu *et al.* (2007), são quatro os elementos básicos que se encontram em um processo de retificação: a máquina retificadora, o reboło, a peça obra, o fluido de retificação e o processo de dressagem, conforme pode ser visto na Figura 3.2.

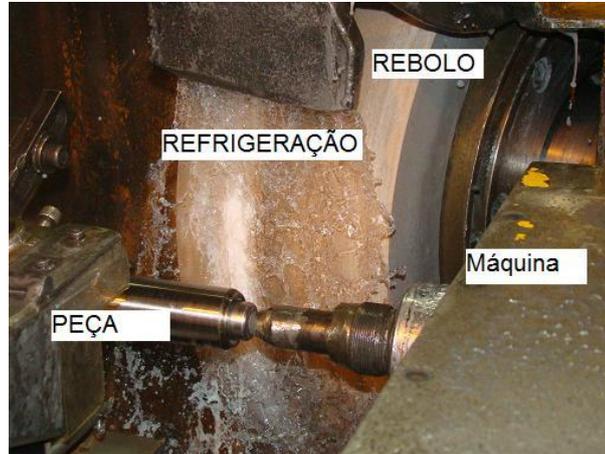


Figura 3.2. Elementos de retificação (Dana, 2012)

### 3.1.1 Reboło

Reboło é a denominação da ferramenta usada em processos de retificação. A especificação de rebołos é normatizada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), DIN (*Deutsches Institut für Normung*) e ISO (*International Organization for Standardization*). A Figura 3.3 mostra um exemplo de marcação padronizada destes rebołos.

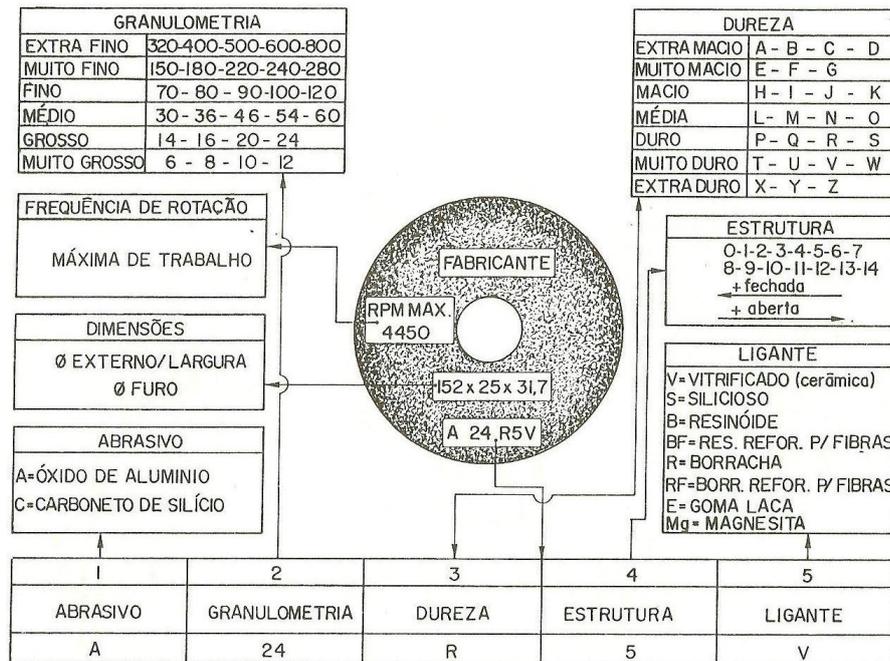


Figura 3.3. Identificação de rebołos convencionais (Stemmer, 1995).

Os rebolos são classificados por suas características, que podem ser mescladas: tipo de abrasivo, granulometria, estrutura, ligante e dureza.

Existem diversos tipos de abrasivos, e uma qualidade importante a ser observada durante o processo de escolha, é a sua dureza.

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são uma característica nos processos de usinagem com abrasivos, onde geralmente os grãos maiores são utilizados para corte e limpeza, enquanto que os grãos mais finos para polimento e lapidação. Para rebolos com abrasivos de diamante ou CBN, as normas ISO 6104 (1979) e DIN 69800 fornecem sugestão de marcação conforme Figura 3.4 (Stemmer, 1995).

Prefixo	Abrasivo	Granulometria		Dureza		Concentração			Ligante	Sufixo	Espessura Revestimento	Corpo	
Simbolo do fabricante	D	126		J		C75 **			B	Especificação o camada abrasivo	2	B	
	D	Diamante	FEPA *	MESH	J	Macio	Quilates/cm <sup>3</sup>	Nº	B	Resinóide	Espessura em mm	A	Alumínio
	SD	Diamante	181	80/100	N	Médio	D 1.1	C25	BZ	Bronze		S	Aço
		Sintético	151	100/120	R	Duro	I 1.65	C38	G	Galvânico	B	Baquelite	
	B	CBN	125	120/140	P	Duro	A 2.2	C50	M	Metálico	BZ	Bronze	
			107	140/170	T	Extra-Duro	M 3.3	C75	V	cerâmico			
			91	170/200			A 4.4	C100					
			76	200/230			N 5.5	C125					
							T 6	C135					
							E 6.6	C150					
							Vol 1%	Nº					
							C 12	V120					
							B 18	V180					
							N 24	V240					

\* FEPA- O Nº corresponde ao tamanho da malha, em microns (µm)

\*\* Corresponde a participação percentual, em volume, do diamante no revestimento. Um quilate = 0,2g

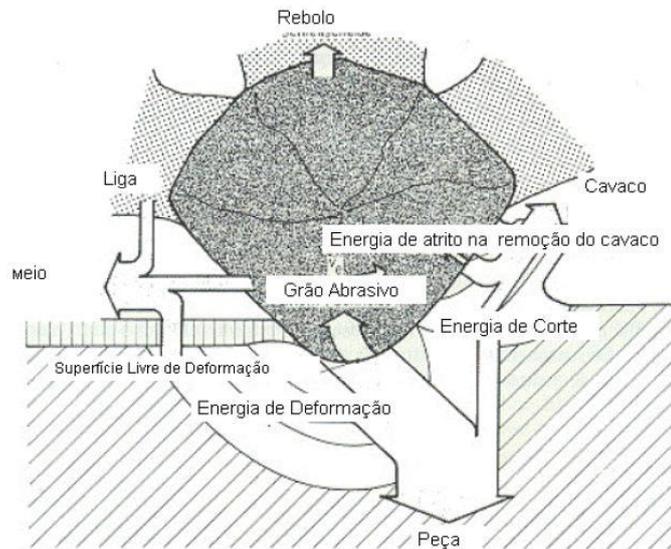
**Figura 3.4.** Identificação para rebolos com abrasivos de diamante ou CBN (Stemmer, 1995).

O ligante ou aglutinante tem a função de unir os grãos abrasivos entre si e também se for o caso, com o suporte. Já a estrutura do rebolo refere-se ao espaçamento entre os grãos e é dada por números de 0 a 12, sendo de uma estrutura fechada para 0 até uma estrutura aberta para 12. De acordo com Stemmer (1995), para a seleção da estrutura, devem-se levar em conta o material a ser trabalhado, o acabamento desejado e o tipo de trabalho.

Ainda segundo Stemmer (1995), dureza é a resistência oposta ao arrancamento dos grãos. A capacidade de retenção dos grãos abrasivos depende do tipo de ligante, do tamanho dos grãos e dos vazios e da espessura das pontes de ligante, que unem os grãos entre si. Em outras palavras, a dureza ideal é aquela em que os grãos gastos e arredondados são arrancados por si, de modo que o rebolo se reafia, sem a necessidade de dressagem. Como regra, quanto mais duro o material a ser retificado, mais macio deve ser o rebolo, e vice-versa.

### 3.1.2 Distribuição de Energia no Corte

A Figura 3.5 mostra que a energia mecânica introduzida no processo pode ser dividida em três: energia de atrito na remoção do cavaco, energia de deformação e energia de corte.



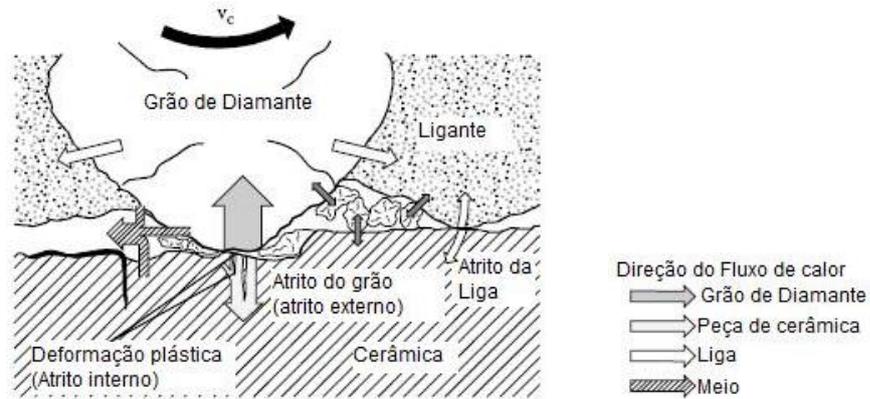
**Figura 3.5.** Distribuição de energia no gume do grão abrasivo, na peça e no meio e na retificação (Marinescu *et al.*, 2007)

Em decorrência dos poucos gumes afiados, a maior parte da energia é transformada em energia térmica pelo atrito no flanco dos gumes (arestas de corte) e do material em deformação plástica na região superficial da peça. Além disto, tem-se a produção de calor ou a transformação de energia em calor, nas faces do grão, durante a remoção de cavaco propriamente dito. Por último, deve-se mencionar que uma parte da energia, principalmente quando se trata de rebolos ligados, é transformada em calor em decorrência do atrito do ligante sobre a superfície da peça (Marinescu *et al.*, 2007).

Na usinagem com ferramentas de geometria não definida, as principais fontes de calor se encontram abaixo da aresta de corte, de forma que a maior parte do calor, inicialmente, flui para dentro da peça e lá provoca um aumento localizado de temperatura (Fig. 3.6). Este aumento de temperatura pode, dependendo da sua ordem de grandeza e do tempo de atuação, provocar mudanças na estrutura cristalina do material da peça, bem como fenômenos de oxidação superficial da peça (camada termicamente afetada pelo calor) e trincas superficiais.

Pela utilização de fluidos de corte, é possível reduzir o tempo de atuação do calor e a magnitude do aumento de temperatura de maneira favorável. Assim, a ação lubrificante do fluido de corte leva a uma redução do atrito e, com isso, reduz a geração de calor, ao passo

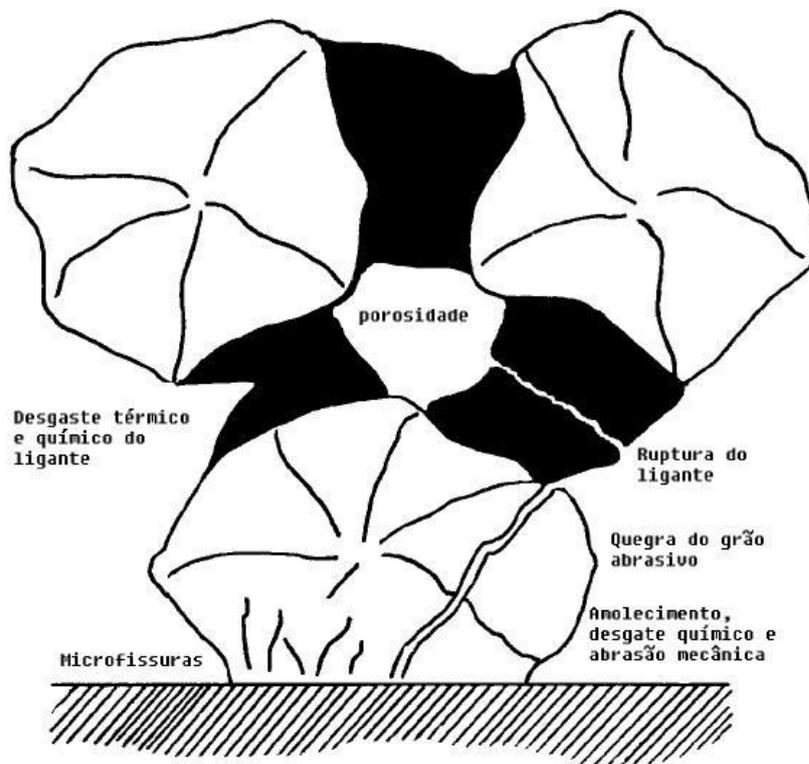
que o fluido propriamente dito propicia uma remoção rápida do calor da peça. Além disto, a lubrificação tem a vantagem de reduzir o desgaste do grão abrasivo (König, 1980).



**Figura 3.6.** Fluxo de dissipação do calor gerado na retificação de material cerâmico (Marinescu *et al.*, 2007).

### 3.1.3 Desgaste do Grão Abrasivo

As influências térmicas influenciam não só a peça-obra, mas também, a ferramenta. A Figura 3.7 mostra que o desgaste dos grãos abrasivos tem início nas camadas cristalinas próximas à camada superficial do grão abrasivo.



**Figura 3.7.** Mecanismo de desgaste do grão abrasivo (Marinescu *et al.*, 2007).

Nestas camadas cristalinas citadas (Fig. 3.7), as pressões de contato e as temperaturas extremamente altas levam a fenômenos de oxidação e de difusão que reduzem a resistência abrasiva do material. Forma-se uma camada menos resistente à compressão que, devido à ação mecânica subsequente, é removida por abrasão e, com isso, novas camadas cristalinas do grão estão sendo submetidas a esse tipo de desgaste (König, 1980; Marinescu *et al.*, 2007).

Pela ação mecânica e térmica alternadamente, é possível ocorrer fadiga em locais com falhas que podem ser encontradas em todo o material (na forma de impurezas na estrutura cristalina, em contornos de grão, variações de dureza etc.), onde iniciam as fissuras de fadiga. Estas fissuras podem se propagar e levar ao lascamento de partes do grão ou podem provocar a formação de uma microfissura (microdesgaste) que pode levar ao fissuramento de grandes partes do grão abrasivo (macrodesgaste). Em muitos casos, o desgaste do grão abrasivo é a causa imediata para o desgaste do ligante. Devido ao achatamento da aresta de corte tem-se um aumento da força de atrito, que leva a um aumento localizado na força de corte e, com isto, ultrapassa-se a resistência mecânica do ligante, ocasionando vibração entre peça e rebolo, aumentando assim a rugosidade superficial da peça.

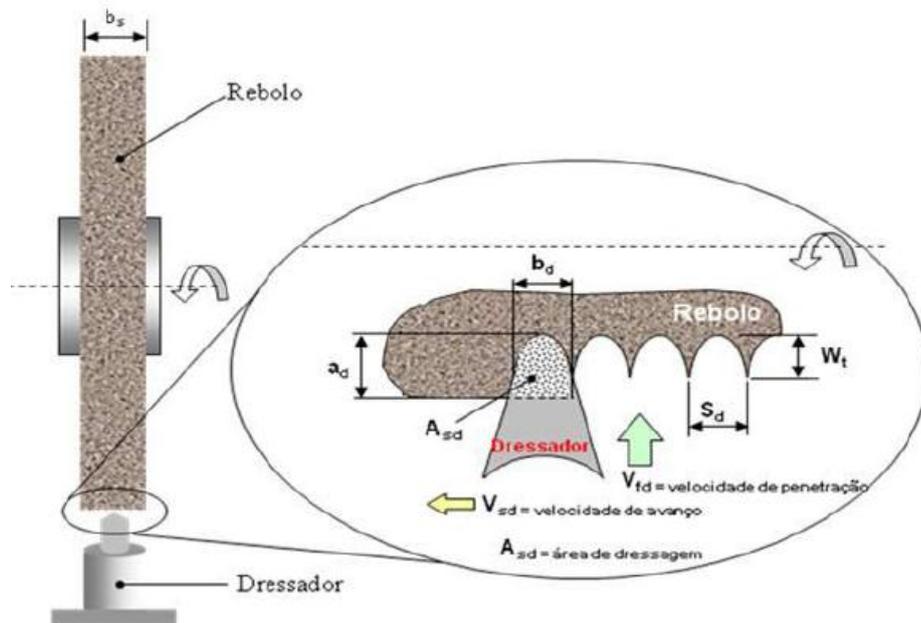
É possível que ocorra a quebra de vários grãos em cadeia, dependendo de como o grão está ancorado no ligante. Este desgaste pode estar mais localizado no grão ou mais no ligante. O ligante também pode sofrer um desgaste diretamente pela ação térmica ou química do meio, liberando o grão abrasivo prematuramente (Marinescu *et al.*, 2007). O desgaste localizado na superfície do grão é considerado como sendo o desgaste de “microefeito” e o desgaste de lascamentos de grãos e ruptura do ligante é considerado como um “macroefeito”.

#### **3.1.4 Dressagem do Rebolo**

O desempenho do processo de retificação depende principalmente da forma com que o rebolo é preparado. O processo de dressagem deve produzir uma topografia adequada para o rebolo além do perfil desejado. A topografia do rebolo influencia na rugosidade e na camada superficial da peça por meio da quantidade e forma das arestas de corte, do volume do poro e do comportamento do desgaste da camada abrasiva (Linke, 2008).

De acordo com Hassui e Diniz (2003) as condições de dressagem influenciam diretamente na taxa de remoção de material, e interfere também na rugosidade da peça produzida. A Figura 3.8, adaptada de Bianchi (1990), representa o esquema de dressagem. Em operações grossas, onde o grau de recobrimento é pequeno e o número de arestas atuantes é reduzido, tem-se um aumento na profundidade dos sulcos que, conseqüentemente, provoca

valores mais elevados na rugosidade. Em operações finas, com valores maiores de grau de recobrimento, um número significativamente maior de arestas atuantes divide os esforços e cada grão abrasivo penetra menos na peça, reduzindo assim os valores de rugosidade.



**Figura 3.8.** Esquema de dressagem do rebolo (Bianchi, 1990).

O processo de dressagem deve promover um processo de retificação tão consistente quanto possível, levando-se em conta o desgaste do rebolo. A operação de dressagem, ainda é pouco conhecida devido à influência das condições de dressagem na retificação, pois a geometria do dessorador é um fator de grande influência que frequentemente não é levado em conta (Linke, 2008).

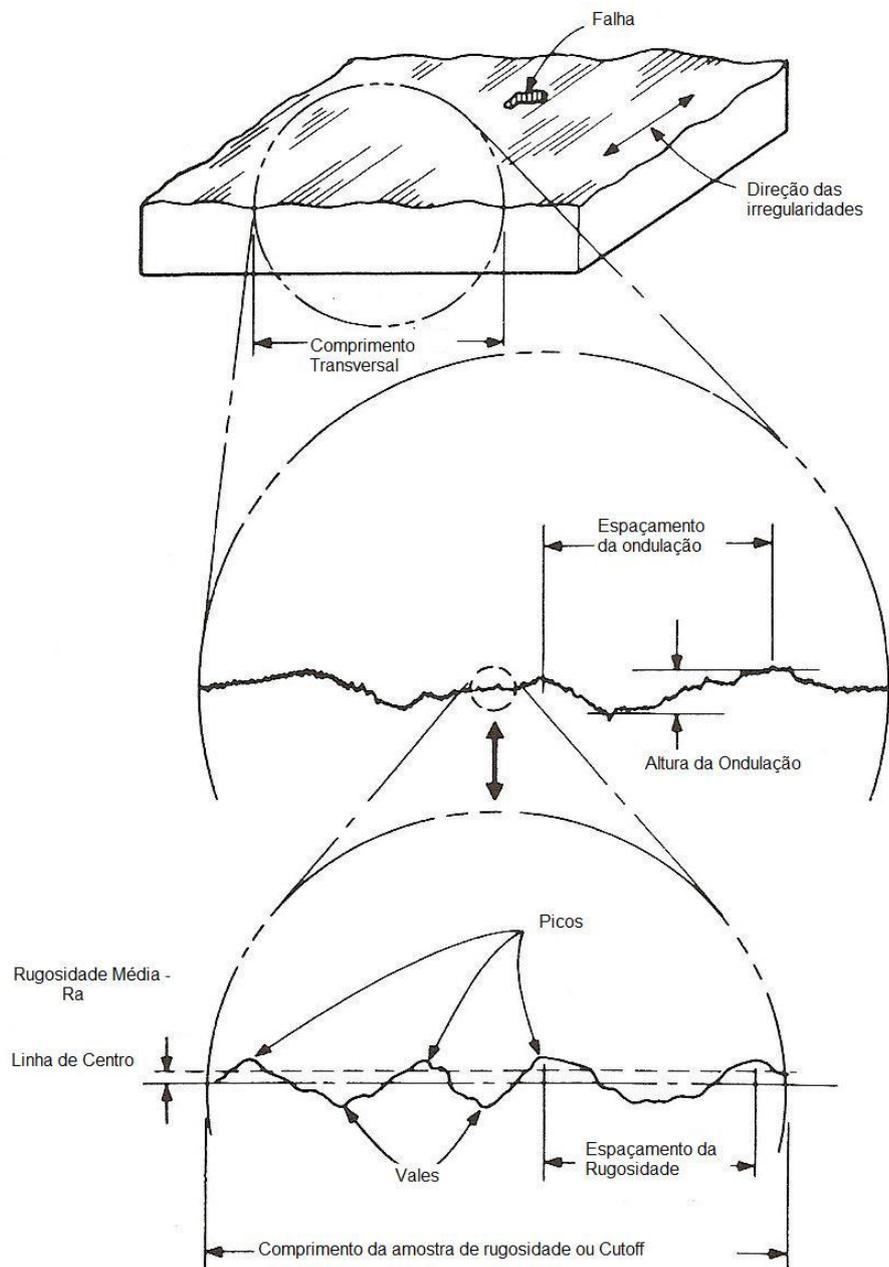
### 3.2 Acabamento Superficial

As superfícies das peças fabricadas apresentam qualidades bastante diferentes entre si, já que as saliências e reentrâncias resultantes do(s) processo(s) de fabricação são distintas e irregulares. Para gerar um acabamento adequado a uma superfície usinada por retificação é necessário, portanto, determinar o grau em que as peças devem ser retificadas, ou seja, é preciso que se tenham métodos que possibilitem avaliar a qualidade desta superfície, tanto em termos de textura quanto de integridade.

Oberg (1996) define a textura superficial como o resultado do processo utilizado para a sua obtenção. Já Malkin (1989) diz que para se avaliar a qualidade superficial devem-se considerar dois aspectos: a integridade superficial e a textura superficial.

A integridade superficial está associada com as alterações mecânicas e metalúrgicas das linhas de superfície induzidas pela usinagem. Na retificação, os aspectos mais importantes na integridade superficial da peça são os danos térmicos causados pelo excesso de temperatura na retificação.

A textura superficial se refere à microgeometria ou topografia das superfícies usinadas, as quais usualmente são caracterizadas pela rugosidade (Malkin, 1989). De acordo com Oberg (1996) a rugosidade é composta pelas menores irregularidades da textura superficial, as quais são inerentes ao processo produtivo. Estas podem ser devido a avanços transversais e outras irregularidades que se encontrem dentro do comprimento de medição da rugosidade (Fig. 3.9).



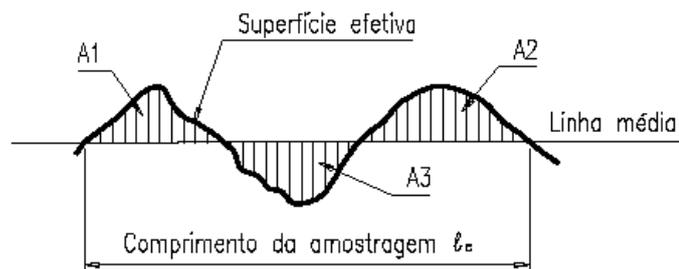
**Figura 3.9.** Ilustração de textura superficial de acordo com a norma ANSI (Malkin, 1989).

### 3.2.1 Critérios para Avaliar a Rugosidade

De acordo com Marinescu *et al.* (2007), Malkin (1989), Blanch (1979) e Nussbaum (1988), existem várias normas que definem os parâmetros e a forma para medição de rugosidade, porém serão utilizadas as normas NBR ISO 8404 (1984) e a NBR ISO 4287 (2002) neste trabalho.

Existem basicamente dois sistemas de medição de rugosidade: o sistema da linha média (LM) e o sistema da envolvente (E). O sistema da linha média é o mais utilizado. Brasil, EUA, Inglaterra, Japão e Rússia normalmente adotam o sistema (LM); Alemanha e Itália normalmente adotam o sistema (E). Já a França adota ambos os sistemas.

De acordo com a norma NBR ISO 4287 (2002), a Linha Média (LM) é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem ( $l_e$ ) (Fig. 3.10).



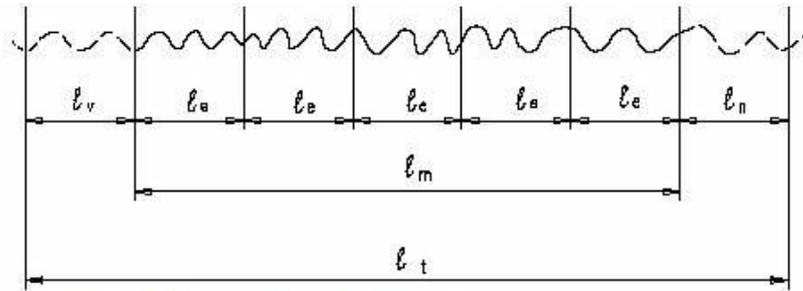
A1 e A2 áreas acima da linha média = A3 área abaixo da linha média.

**Figura 3.10.** Sistema da linha média (NBR ISO 4287, 2002).

Durante o processo de medição da rugosidade, o rugosímetro apalpa a superfície a ser medida. Podem-se definir vários comprimentos neste processo (Fig. 3.11):

- Comprimento ou Percurso Inicial ( $l_v$ ): é a extensão da primeira parte do primeiro trecho, projetado sobre a LM e não utilizado na avaliação da rugosidade. Este trecho inicial tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais do sistema de medição e a centragem do perfil de rugosidade (partida do apalpador).
- Comprimento ou Percurso de Medição ( $l_m$ ): é a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação, projetado sobre a LM.
- Comprimento ou Percurso Final ( $l_n$ ): é a extensão da última parte do trecho apalpado, projetado sobre a LM e não utilizado na avaliação. O trecho final tem a finalidade de

permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição (parada do apalpador).



$l_m$ : comprimento do percurso de medição;  
 $l_t$ : comprimento total de medição  
 $l_v$ : comprimento para atingir a velocidade de medição;  
 $l_n$ : comprimento para parada do apalpador.  
 $l_e$ : Comprimento de amostragem

**Figura 3.11.** Representação gráfica do *cut-off* (Marinescu *et al.*, 2007).

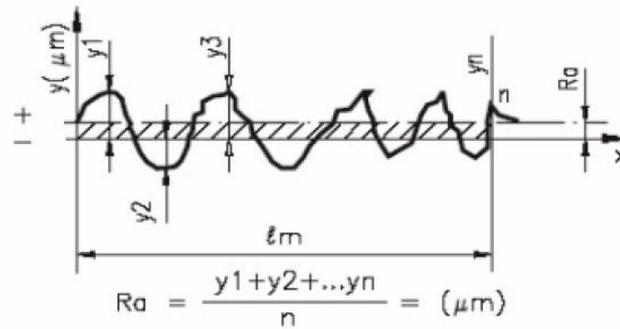
- Comprimento Total de Medição ( $l_t$ ): é o percurso total do apalpador pelo sistema de medição, ou seja, é a soma dos percursos inicial, de medição e final  $\Rightarrow l_t = l_v + l_m + l_n$ .
- Comprimento ou Percurso de Amostragem ( $l_e$ ): é igual a 1/5 do percurso de medição, ou seja,  $l_e = l_m/5$ . O comprimento de amostragem deve ser o suficiente para avaliar a rugosidade, isto é, deve conter todos os elementos representativos de rugosidade.

A rugosidade superficial é expressa pela determinação de parâmetros obtidos a partir do perfil da superfície.

Dentre os parâmetros para a avaliação da rugosidade, o mais utilizado no mundo em processos de fabricação por usinagem é o  $R_a$  por: ser aplicável à maioria dos processos; estar presente em praticamente todos os equipamentos de medição; e poder caracterizar a distribuição de amplitude de acordo com a curva de Gauss (Rebrac, 2012).

A Rugosidade Média Aritmética  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] (*roughness average*<sup>1</sup>) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos  $y(x)$  dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $l_m$ ), conforme mostra a Figura 3.12.

<sup>1</sup> Na Inglaterra,  $R_a$  é denominada *center line average* [ $\mu\text{in}$ ]; nos EUA, *arithmetical average* [ $\mu\text{in}$ ].



**Figura 3.12.** Representação gráfica do parâmetro de rugosidade  $R_a$  (NBR ISO 4287, 2002).

Na medição da rugosidade em perfis onde não se consegue ver a periodicidade da ondulação (superfícies obtidas por retificação, por exemplo) são recomendados valores para o comprimento da amostragem em função da rugosidade média ( $R_a$ ), conforme a Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Relação de valores de *cut-off* com os de rugosidade  $R_a$  (Marinescu *et al.*, 2007)

Rugosidade $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Mínimo <i>cut-off</i> [mm]
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2	0,80
Maior que 2 até 10	2,50
Maior que 10	8,00

### 3.3 Efeitos dos Parâmetros de Corte na Rugosidade

Certos parâmetros cinemáticos e de processo influenciam na rugosidade gerada na peça por retificação. A análise desta influência é descrita por Marinescu *et al.* (2007):

- *Velocidade de corte do rebolo*: no caso de retificação, o comprimento de contato entre o rebolo e a peça é pequeno, sendo as forças de retificação relativamente pequenas quando comparadas com outros processos. Existem apenas algumas arestas de corte atuando ao mesmo tempo (apesar de a força em cada grão ser alta). Aumentando a velocidade de corte do rebolo com um avanço constante, a espessura do cavaco ( $h_{cu\text{ eff}}$ ) e a profundidade de usinagem ( $h_{cu}$ ) são reduzidas, fazendo com que as forças de retificação também diminuam, pois diminui a área da seção transversal de corte. No entanto, as tensões térmicas na ferramenta e na peça aumentam; porém, a rugosidade diminui.
- *Velocidade de avanço*: a velocidade de avanço influencia diretamente o tempo de ciclo de retificação. Um aumento na velocidade de avanço resulta no aumento espessura do cavaco

( $h_{cu\text{ eff}}$ ) e na profundidade de usinagem ( $h_{cu}$ ), além da elevação da força de usinagem, assim como nas tensões térmicas sobre a peça e a ferramenta. Logo, haverá também um aumento na rugosidade superficial da peça.

- *Velocidade de avanço de dressagem*: esta velocidade é, em grande parte dos casos, empregada como aproximação, pelo conhecimento empírico do operador/processista. Na prática, muitos problemas são causados pelo avanço muito baixo. O resultado é um rápido desgaste do dressador e danos aos grãos abrasivos. A força de usinagem se elevará e o rebolo necessitará de dressagens mais frequentes.

### 3.4 Análises Estatísticas do Processo

O *Statistical Process Control* – SPC (AIAG, 2005) estabelece que “um processo está operando ‘sob controle estatístico’ quando as únicas fontes de variação são de causas comuns”. Primeiramente, o processo deve ser posto ‘sob controle estatístico’, através da detecção e ação sobre as causas especiais de variação. Então seu desempenho se torna previsível e sua capacidade em satisfazer as expectativas do cliente pode ser avaliada. Isto é a base para a melhoria contínua.

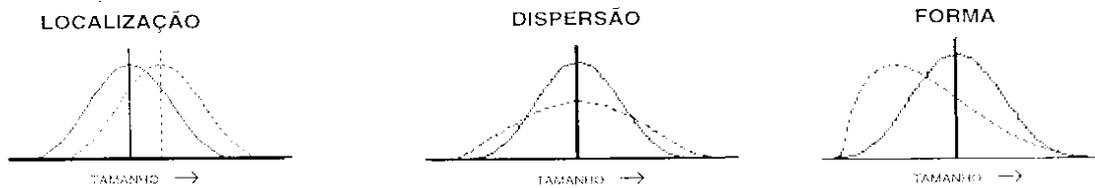
A prática aceita na indústria automotiva é calcular a capacidade só depois que um processo tenha demonstrado estar ‘sob controle estatístico’.

A capacidade é usada como uma base para a previsão de como o processo vai operar, usando dados estatísticos obtidos através de um processo. Há pouco valor em fazer previsões baseadas em dados coletados de um processo que não é estável e que não se repete ao longo do tempo. Causas especiais são responsáveis por mudanças na forma, na dispersão e na localização de um processo e assim pode rapidamente invalidar a previsão da capacidade. Os vários índices e taxas de capacidade são baseados na exigência de que dados usados para calculá-los sejam obtidos de um processo que esteja ‘sob controle estatístico’.

#### 3.4.1 Variação: Causas Comuns e Especiais

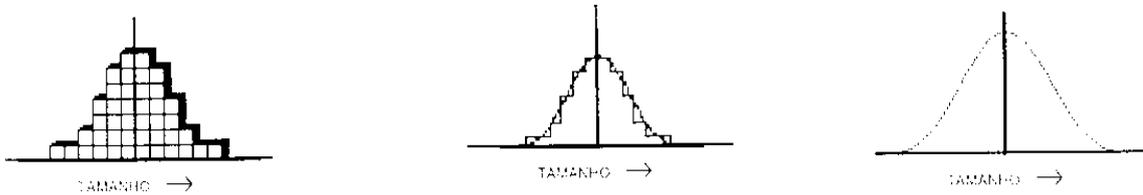
Dois produtos ou características nunca são exatamente iguais, pois qualquer processo contém muitas fontes de variabilidade. A diferença entre os produtos podem ser grandes ou infinitamente pequenas, entretanto para gerenciar qualquer processo e reduzir sua variação é necessário fazer uma distinção entre causas comuns e causas especiais de variação. Valores tomados individualmente são considerados distintos, porém como um grupo eles tendem a

formar um padrão que podem ser descritos como uma distribuição, que por sua vez pode diferir conforme a Figura 3.13.



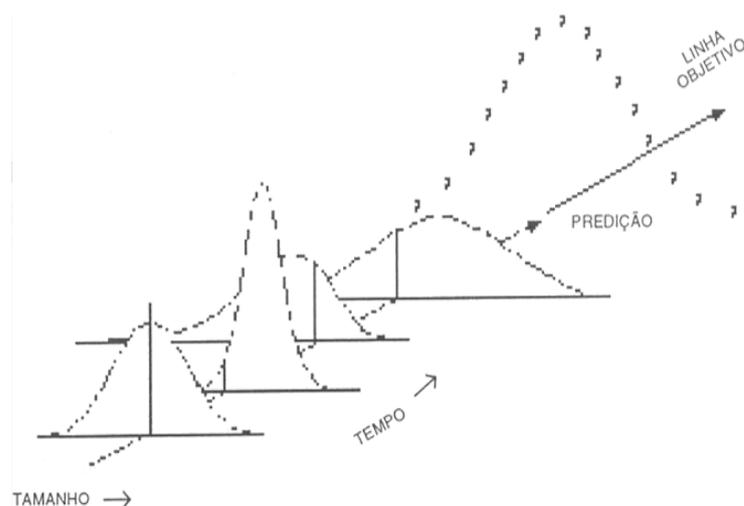
**Figura 3.13.** Representação das diferentes distribuições (Manual do CEP, 2005)

Se apenas causas comuns de variação estiverem presentes, o resultado do processo forma uma distribuição que é estável ao longo do tempo e previsível conforme Figura 3.14, onde cada caixa representa o valor de uma peça medida, formando uma distribuição estável.



**Figura 3.14.** Representação da presença de causas comuns, formando uma distribuição estável (Manual do CEP, 2005)

Se causas especiais de variação estiverem presentes, o resultado do processo não é estável ao longo do tempo, onde através da avaliação das distribuições podem-se identificar diferentes distribuições, médias e dispersões nos estudos representados pela Figura 3.15.



**Figura 3.15.** Representação da presença de causas especiais, resultando em um processo que não é estável ao longo do tempo (Manual do CEP, 2005)

### 3.4.2 Interpretação da Capabilidade do Processo conforme Manual do CEP - AIAG

A capabilidade do processo é definida através da necessidade de determinar se o processo é capaz de atender às especificações estabelecidas com suas variações naturais.

Estar ‘sob controle estatístico’ não é o suficiente, pois um processo sob controle pode produzir peças rejeitáveis. A verdadeira melhoria de um processo é obtida através do equilíbrio entre repetibilidade, consistência e capacidade de atender às especificações de projeto, mais conhecida como capabilidade do processo.

Seja em resposta a um critério de índice de capabilidade que não tenha sido atendido, ou para a contínua necessidade de melhoria de custo e desempenho da qualidade, a ação requerida é melhorar o desempenho do processo. Para isso, reduz-se a variação que vem das causas comuns, ou muda-se a média do processo a um valor mais próximo do alvo.

Para melhorar a capabilidade do processo, deve existir uma maior atenção na redução de causas comuns. Ações devem ser direcionadas sobre o sistema, isto é, sobre os fatores que contribuem na variabilidade do processo, tais como: desempenho da máquina; consistência dos materiais de entrada; métodos básicos pelos quais o processo opera; e métodos de treinamento ou ambiente de trabalho. Como regra geral, estas causas relacionadas com o sistema, gerando uma capabilidade inaceitável do processo, podem estar além das habilidades do operador/processista ou de uma supervisão local para a correção.

Para medir objetivamente até que ponto o processo está ou não em conformidade, são utilizados índices de capabilidade e desempenho para indicar graficamente esta medida.

### 3.4.3 Definição dos Índices de Capabilidade e Desempenho do Processo

Conforme afirma Montgomery (2001),  $C_p$  é o índice de capabilidade definido como o intervalo da tolerância dividido pela capabilidade do processo, independentemente da centralização do processo. O índice  $C_p$  é dado pela Equação 3.1.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}_{(R/d_2)}} \quad (3.1)$$

Onde:

- LSE: limite superior de especificação;
- LIE: limite inferior de especificação;
- $\hat{\sigma}$ : desvio-padrão estimado

O desvio padrão é estimado pela Equação 3.2

$$\hat{\sigma} = \bar{R} / d_2 = \left( \hat{\sigma}_{\bar{R}/d_2} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

- $\bar{R}$  : média das amplitudes da amostra;
- $d_2$ : constante que varia com o tamanho da amostra de 2 a 10 conforme Tabela 3.2.

**Tabela 3.2.** Constante  $d_2$  em função do tamanho de amostra (Manual do CEP, 2005)

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_2$	1,13	1,69	2,06	2,33	2,53	2,70	2,85	2,97	3,08

$Cpk$  é o índice de capacidade: considera a centralização do processo, relacionando a distância entre a média do processo e o limite de especificação mais próximo, com a metade da dispersão total (Montgomery, 2001). O índice  $Cpk$  é dado pela Equação 3.3.

$$Cpk = \text{Mín} \left( \frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{3\hat{\sigma}_{R/d_2}}, \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\hat{\sigma}_{R/d_2}} \right) \quad (3.3)$$

$Pp$  é o índice de desempenho: intervalo da tolerância dividido pelo desempenho do processo, independentemente da centralização. O índice  $Pp$  é dado pela Equação 3.4.

$$Pp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (3.4)$$

Onde:

- LSE: limite superior de especificação;
- LIE: limite inferior de especificação;
- $\sigma$  : desvio-padrão calculado.

O desvio padrão é calculado pela Equação 3.5.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{\bar{X}})^2}{(n-1)}} \quad (3.5)$$

Onde:

- $X_i$ : valor de cada amostra;
- $\bar{\bar{X}}$  : média das médias dos subgrupos;
- n: número total de amostras.

$Ppk$  é o índice de desempenho, que leva em conta a centralização do processo (Montgomery, 2001). O índice  $Ppk$  é dado pela Equação 3.6 (o  $Ppk$  é dado pelo menor valor).

$$Ppk = \text{Min} \left( \frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{3\sigma}, \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\sigma} \right) \quad (3.6)$$

Para ser capaz, um processo necessita de centralização entre os limites de especificação e baixa variação/dispersão. É apropriado dizer que a variação do processo e a centralização do processo são duas características isoladas do processo. Cada uma delas precisa ser entendida separadamente uma da outra, conforme Manual do CEP (2005). Porém a Dana Indústrias Ltda. (local onde este estudo foi desenvolvido) estabelece metas específicas para a capacidade do processo com critério de aceitação mínimo de  $Cp \geq 1,67$  e  $Cpk \geq 1,67$ , já o desempenho do processo, medido através dos índices de  $Pp$  e  $Ppk$  priorizam as melhorias no decorrer do tempo através de tendências, priorizando a sequência em que os processos devem ser melhorados, cujo critério estabelece que, para o processo possuir desempenho considerado satisfatório, terá que apresentar  $Pp \geq 1,67$  e  $Ppk \geq 1,67$ .

#### 3.4.4 Índice PPM (Partes Por Milhão)

O índice  $PPM$  é calculado com base nos limites de especificação e na curva de distribuição dos dados: determina quantas não-conformidades podem ocorrer em um milhão. Resulta da soma de não conformidades que estão abaixo do  $LIE$ , conforme Equação 3.7, e as não conformidades que estão acima do  $LSE$ , conforme Equação 3.8, em que  $f(x)$  é o coeficiente da distribuição usada.

$$PPM_{\text{inferior}} = 1.000.000 \times f(LSE) \quad (3.7)$$

$$PPM_{\text{superior}} = 1.000.000 \times [1 - f(LSE)] \quad (3.8)$$

O  $PPM$  total é soma do  $PPM$  inferior e do  $PPM$  superior, conforme Equação 3.9.

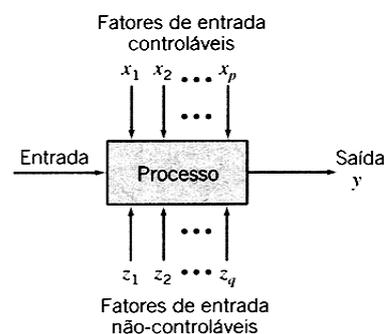
$$PPM_{\text{total}} = PPM_{\text{inferior}} + PPM_{\text{superior}} \quad (3.9)$$

#### 3.4.5 Projeto de Experimentos

Segundo Moore e McCabe (1998), o Projeto de Experimentos é uma ferramenta, ou técnica estatística, que serve para alcançar a melhor estratégia para a mudança. Consiste em

abordagem sistemática para coletar informações que orientam para melhorias de qualquer processo. Os modelos estatísticos são desenvolvidos representando o processo sob estudo, onde simulação e otimização de ferramentas podem ser aplicadas para testar e confirmar as propostas de melhorias. Além disso, o projeto experimental proporciona uma metodologia eficiente de coleta de dados experimentais para a construção do modelo, onde se torna possível obter o máximo de informações com um determinado número de experimentos.

Montgomery (2001) afirma que um experimento projetado é um teste, em que são feitas mudanças propositais nas variáveis de entrada de um processo com a finalidade de se observar as mudanças correspondentes na resposta de saída. O processo pode ser representado na Figura 3.16, visualizado como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas que transforma um material de entrada em um produto de saída. Este produto de saída pode ter várias respostas. Algumas variáveis do processo ( $x_1, x_2, \dots, x_p$ ) são controláveis, enquanto outras ( $z_1, z_2, \dots, z_q$ ) são não controláveis, embora possam ser controláveis durante a execução do teste. Os fatores não controláveis são chamados de *ruído* e para minimizá-los pode ser executada uma replicação durante os estudos.



**Figura 3.16.** Representação do modelo de um processo (Montgomery, 2004).

Os objetivos do experimento são:

- Determinar quais variáveis são mais influentes na resposta (saída)  $y$ ;
- Determinar o valor a ser atribuído aos  $x$  influentes para minimizar a variabilidade em  $y$ .

Os métodos de projeto de experimentos podem ser usados tanto no desenvolvimento quanto na solução de problemas do processo, para melhorar o seu desempenho ou obter um que seja robusto ou pouco sensível a fontes externas de variabilidade (Montgomery, 2004).

O objetivo final do projeto de experimento é definir quais características são melhores que outras para a obtenção do melhor processo. Sob esta ótica, torna-se relevante a realização de um experimento para buscar o desenvolvimento de novos conhecimentos, além de resolver problemas rapidamente através de melhorias no processo.

Para melhor entendimento da análise de experimentos, os seguintes termos são empregados (Schaeffer, 1995):

- *Fator*: causa que impacta ou afeta a variável resposta. Elemento que pode influenciar no processo como máquinas, dispositivos, operadores, pressão, temperatura dentre outros.
- *Fator controlável*: elemento que pode ter seu nível definido durante o processo, e que influencia diretamente os parâmetros que caracterizam o processo produtivo.
- *Fator não controlável*: elemento cujo nível não pode ser situado num processo produtivo.
- *Nível de um fator*: valor do fator que está sendo examinado no experimento; pode ser quantitativo (assumir valores numéricos) ou qualitativo (alto ou baixo, por exemplo). Normalmente, a maioria dos projetos tem dois níveis.
- *Experimento*: conjunto planejado de operações, com o objetivo de descobrir novos fatos, confirmar ou negar resultados.
- *Variabilidade, erro ou ruído*: quando provas experimentais são repetidas sem mudar a composição dos fatores, a resposta pode variar, devido a pequenos efeitos de mudanças em muitos fatores não controláveis, que existem em todos os experimentos e medições.
- *Replicação*: prática de repetir execuções experimentais para obter uma estimativa quantitativa do total de erros de medição.

A definição dos fatores de maior importância sobre os resultados são estabelecidos a partir de uma análise prévia do processo, onde são definidos quais fatores devem ser incluídos no experimento completo a ser realizado sobre o processo.

### 3.4.6 Experimento Fatorial

A melhoria da qualidade e da produtividade é mais eficaz quando é parte integrante do ciclo de desenvolvimento do produto e do processo.

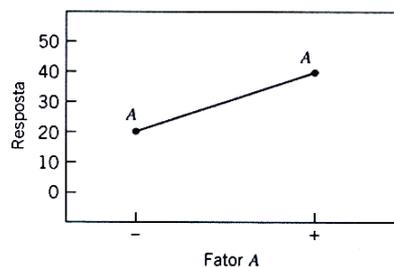
Segundo Montgomery (2001), o uso eficaz da metodologia do planejamento experimental estatístico pode levar a produtos mais fáceis de serem fabricados, com maior confiabilidade e que têm desempenho de campo acentuado. O projeto de experimentos também pode melhorar o desenvolvimento do processo e as atividades de reparação de defeitos, sendo este o foco principal deste trabalho.

O experimento fatorial é colocado com particular ênfase no sistema de planejamento em dois níveis (isto é, o planejamento fatorial  $2^k$ ), importante para controlar as variáveis em um processo e determinar quais são mais importantes. Quando há vários fatores de interesse em um experimento, um experimento fatorial deve ser usado, pois os fatores variam juntos.

Em cada tentativa completa ou replicação do experimento, são investigadas todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores.

O experimento fatorial completo se inicia com a definição dos fatores a serem estudados, a partir da observação do processo e da definição de prováveis fatores que influenciarão sobre o resultado do mesmo.

Todos os fatores possuem dois níveis denotados pelos sinais “+” e “-”. Estes dois níveis são chamados respectivamente de *alto* e *baixo*. O efeito principal do fator *A* é a diferença entre a resposta média do nível + de *A* e a resposta média no nível - de *A*. Pode ocorrer uma modificação na resposta com a mudança do fator *A* do nível *baixo* (-) para o nível *alto* (+). A resposta pode ser dada graficamente pela Figura 3.17, onde a resposta é considerada quanto “menor”, melhor. Portanto, neste caso, a melhor resposta é obtida ao se utilizar o fator *A* com nível *baixo* (-).



**Figura 3.17.** Exemplo de gráfico dos efeitos principais (Montgomery, 2004).

Segundo Montgomery (2001), o custo e o tempo para executar um projeto de experimentos tornam-se muito elevados com o aumento do número de fatores a serem analisados e por isso aconselha a utilização de projetos de experimentos fracionados.

#### a. Experimento Fatorial Fracionado

De acordo com o aumento do número de fatores, o número rodadas requeridas para uma replicação completa, aumenta rapidamente. Um experimento  $2^6$  requer 64 rodadas. Neste experimento, apenas 6 dos 63 graus de liberdade (gdl) correspondem aos efeitos principais e apenas 15 gdl correspondem à interação de segunda ordem. Os 42 gdl restantes são referentes à associação de interações de terceira ordem ou ordem superior. Caso se considere as interações de ordem superior insignificantes, podem-se obter informações sobre os efeitos principais com apenas uma fração de um projeto experimento completo (Montgomery, 2004).

A maior utilização de fatoriais fracionados está em experimentos de varredura. Estes são geralmente utilizados no início de um projeto, onde o objetivo é identificar os fatores que

possuem grandes efeitos. Aqueles identificados como importantes nesta fase são então analisados mais profundamente em experimentos subsequentes (Montgomery, 2001).

Segundo Montgomery (2001), embora o planejamento  $2^{k-1}$  seja de grande valor na redução do número de rodadas necessárias para um experimento, frequentemente vê-se que frações menores darão quase a mesma quantidade de informação útil a um custo ainda menor. Em geral, um planejamento  $2^k$  pode ser rodado em uma fração  $1/2^p$  chamada de planejamento fatorial fracionado  $2^{k-p}$ . Assim, uma fração  $1/4$  é chamada de planejamento fatorial  $2^{k-2}$ , uma fração  $1/8$  é um planejamento  $2^{k-3}$ , uma fração  $1/16$  é um planejamento  $2^{k-4}$  e assim por diante.

Quando se realizam projetos fatoriais fracionados, não há interações entre alguns fatores de ordens superiores, pois existe um “confundimento” entre eles.

“Confundimento”, segundo a Price Waterhouse & Coopers (PwC, 2001) é quando se multiplicam os “+” e os “-” para os fatores  $A$  e  $B$ , e o mesmo é feito, por exemplo, para os “+” e os “-” para  $C$ ,  $D$  e  $E$ , encontrar-se-á  $AB = CDE$ .

A compreensão do grau de “confundimento” em um fatorial fracionado é referida como resolução, que é identificada por um número Romano (PwC, 2001).

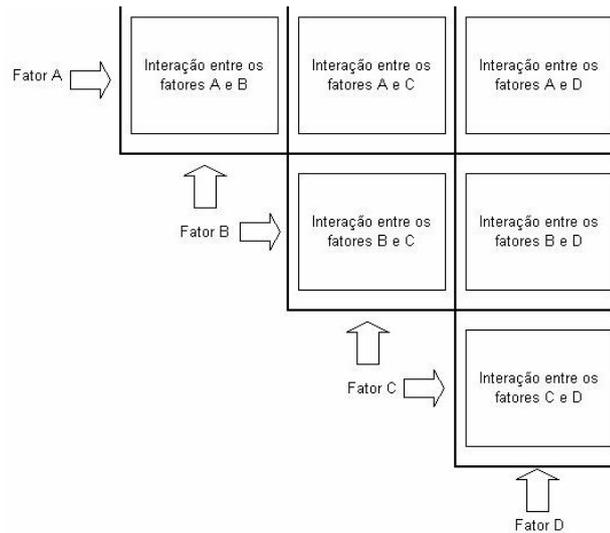
Segundo a PwC (2001), a notação  $2_R^{k-p}$  é uma abreviação útil para descrever muitas propriedades de um projeto, onde:

- $2 \Rightarrow$  número de níveis de cada fator;
- $k \Rightarrow$  número de fatores no experimento;
- $p \Rightarrow$  número de fatores designado para as interações;
- $k-p \Rightarrow$  número de fatores necessários para gerar o projeto básico;
- $2^{k-p} \Rightarrow$  número de interações;
- $2^{-p} \Rightarrow$  fração do fatorial completo  $2^k$ ;
- $2^p \Rightarrow$  número de efeitos principais e de interações confundidas  $p/$  cada efeito computado;
- $R \Rightarrow$  resolução do projeto conforme descrito nas alíneas anteriores.

## **b. Análise das Interações**

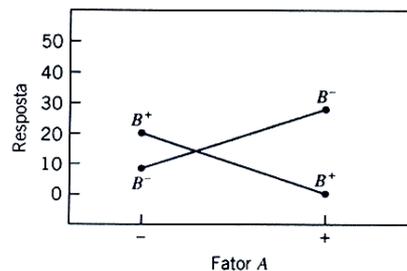
Para a análise visual das interações, há um método gráfico muito utilizado, no qual são formadas interações entre os elementos que demonstram qual a influência destes sobre o resultado final. Na Figura 3.18, é possível identificar a metodologia de funcionamento destes gráficos, onde está representado o sentido das interações, de quais fatores interagem entre si.

Quando uma interação é muito grande, os efeitos principais correspondentes tem pouco significado.



**Figura 3.18.** Gráfico de interações entre fatores (Montgomery, 2004).

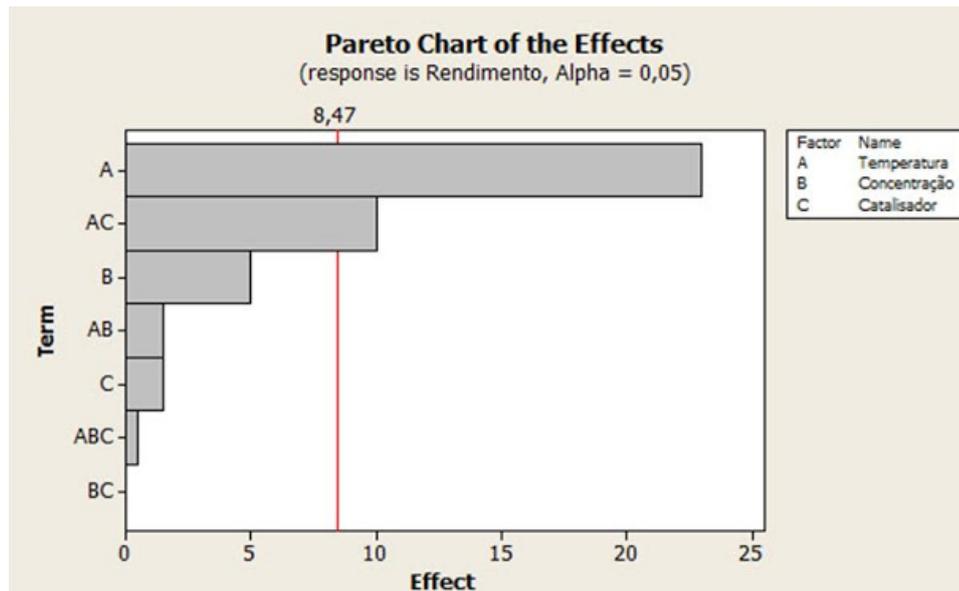
Por exemplo, usando os dados da Figura 3.19, as retas do fator *B* nível *baixo* (–) e *B* nível *alto* (+) não são paralelas, indicando a interação entre os fatores *A* e *B*; tem-se ainda que ao se utilizar o fator *A* nível *alto* (+) e o fator *B* nível *alto* (+), ter-se-á o menor resultado. Assim, o conhecimento da interação *AB* é mais útil do que o conhecimento do efeito principal dos fatores *A* e *B*. Além disso, uma interação significativa pode mascarar a significância dos efeitos principais.



**Figura 3.19.** Exemplo de gráfico de interações entre fatores (Montgomery, 2004).

### c. Gráfico de Pareto dos Efeitos Padrões

O Gráfico de Pareto dos efeitos padrões é um método gráfico utilizado para demonstrar os fatores e/ou interação que possuem significância sobre o processo. Outra informação importante no gráfico da Figura 3.20 é o valor de efeito representado pela linha vertical vermelha, referente à diferença dos resultados determinado com o auxílio do software Minitab 14.1 (Minitab, 2012).



**Figura 3.20.** Exemplo de Gráfico de Pareto dos efeitos padrões (Minitab, 2012)

Na Figura 3.20, os fatores ou suas interações representados pelas colunas com valores abaixo desta linha possuem baixa significância sobre o processo; já as colunas com valores acima se referem aos fatores que apresentam diferença significativa sobre o processo.

### 3.5 Conclusão Teórica

Através do estudo das variáveis do processo de retificação é possível desenvolver e validar uma proposta de melhoria para otimização do processo através de um projeto de experimentos, que permite entender os efeitos das variáveis do processo, além das interações entre os fatores, buscando melhora do desempenho do processo.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

No Capítulo 4 serão caracterizados: o corpo de prova, a ferramenta de corte, a máquina ferramenta e o planejamento experimental do trabalho realizado.

### 4.1 Corpo de Prova

De acordo com a SAE (*Society of Automotive Engineers*), o aço SAE 1141, utilizado na fabricação da luva interna de *cardan* a ser utilizada no estudo, é denominado aço de usinagem fácil, devido aos elevados teores de fósforo e de enxofre encontrados em sua composição química, a qual aparece na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1.** Composição química do Aço SAE 1141 (SAE, 1992).

Elemento Químico	Porcentagem (%)
Carbono	0,37 – 0,45
Manganês	1,35 – 1,65
Fósforo Máx.	0,040
Enxofre	0,08 – 0,13

Após o processo de têmpera e revenimento, a microestrutura é martensita revenida. Esta microestrutura consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas embutidas no interior de uma matriz contínua de ferrita, responsável pelo aprimoramento das propriedades mecânicas de ductilidade e tenacidade.

A dureza e a resistência podem ser explicadas pela grande área de contornos por unidade de volume que existe entre as fases ferrita (contínua, muito dúctil e relativamente tenaz) e cementita (dura e que reforça a matriz de ferrita), para as numerosas e muito finas partículas de cementita (Callister, 2002).

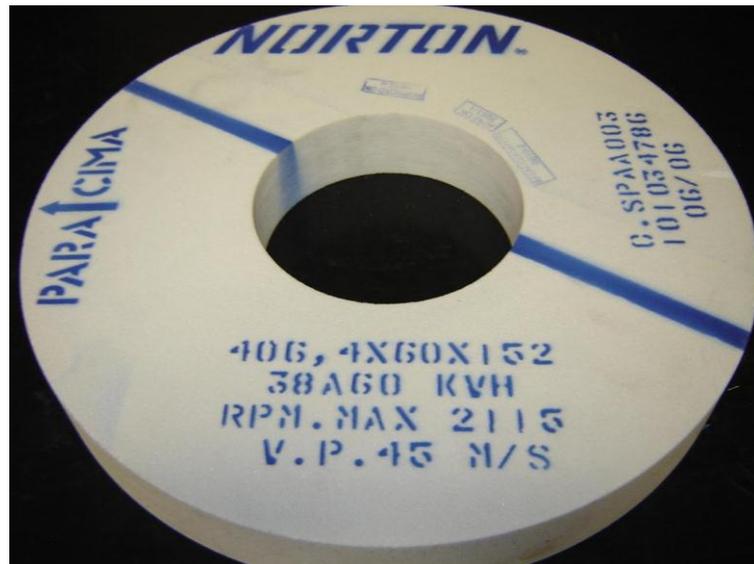
Na Tabela 4.2 são mostradas as propriedades mecânicas do aço SAE 1141.

**Tabela 4.2.** Propriedades mecânicas do aço SAE1141 (SAE, 1992).

Faixa de dureza [HB]	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Elongação no corpo de ensaio de 50,8 mm	Módulo de elasticidade [GPa]
229–269	810–950	689–808	10–15	207

## 4.2 Ferramenta de Corte

O rebolo utilizado para o processo de retificação é um 38 A60 KVH 406,4×60×152. Trata-se de um rebolo de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) branco com uma granulometria média, dureza média, ligante vitrificado, sem especificação de estrutura, com diâmetro externo  $\varnothing 406,4$  mm, espessura de 60 mm e diâmetro de furo para flange  $\varnothing 152$  mm, fabricado pela Saint-Gobain Abrasivos (Fig. 4.1).



**Figura 4.1.** Ferramenta de corte (rebolo) utilizada nos experimentos

Como ferramenta de dressagem é utilizada um dressador diamantado tipo *fliesen* com largura de 1,2 mm conforme mostra a Figura 4.2. Dressador diamantado é a ferramenta empregada para retificar ou perfilar rebolos abrasivos convencionais em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{SiC}$ .



(a)



(b)

**Figura 4.2.** Dressador tipo *fliesen* usado nos ensaios: (a) vista lateral; (b) vista superior

### 4.3 Máquina Ferramenta

A máquina operatriz utilizada na realização dos experimentos foi uma retificadora cilíndrica externa CNC (*Computer Numeric Control*) com as seguintes especificações:

- Fabricante: Zema Zselics Ltda.;
- Modelo: Pratika U-600-S;
- Comando numérico: GE Fanuc Serie 21i-TB;
- Diâmetro máximo retificável: 275 mm;
- Distância máxima entre pontas: 800 mm;
- Comprimento máximo retificável: 600 mm;
- Potência da máquina: 15 kW;
- Carro transversal: hidrostático com incremento mínimo de 0,1  $\mu\text{m}$ ;
- Carro longitudinal: hidrostático com incremento mínimo de 0,1  $\mu\text{m}$ ;
- Velocidade periférica do rebole: 45 m/s (constante).

A retificadora CNC Zema pode ser vista na Figura 4.3.

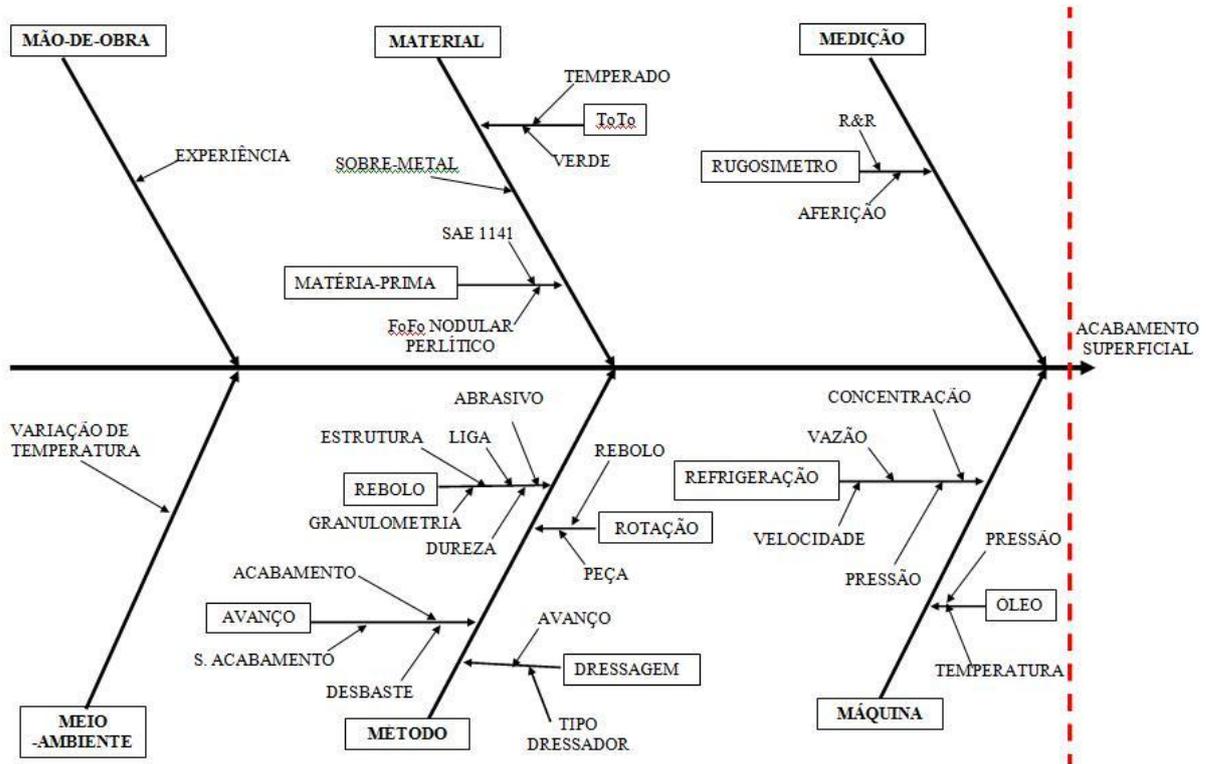


**Figura 4.3.** Retificadora Zema utilizada nos experimentos

### 4.4 Planejamento Experimental

#### 4.4.1 Escolha dos Fatores e Níveis

Com o auxílio de uma equipe multidisciplinar de profissionais experientes no processo de retificação, foram identificados os possíveis fatores que poderiam influenciar na qualidade superficial da peça. Pode-se observar no Diagrama de Ishikawa (Fig. 4.4) o resultado obtido.



**Figura 4.4.** Diagrama de Ishikawa

Devido ao alto número de variáveis contidas no processo, serão analisados os parâmetros que podem ser facilmente controlados a partir do CNC da máquina, para que em um próximo trabalho sejam analisados outros fatores combinados com os que demonstraram maior influência. Neste caso, os parâmetros escolhidos estão apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Parâmetros escolhidos para o estudo

MATERIAL	Sobremetal	sobremetal de desbaste	(SMD)
		sobremetal de semiacabamento	(SMS)
		sobremetal de acabamento	(SMA)
MÉTODO	Avanço (Rebolo)	avanço de desbaste	(fd)
		avanço de semiacabamento	(fs)
		avanço de acabamento	(fa)
		tempo de faiscamento ( <i>spark out</i> )	(Sp)
	Dressagem	velocidade de avanço de dressagem	(vSd)

Primeiramente foram calculados os parâmetros ideais (teóricos) para só então determinar os valores para o nível alto e para o nível baixo dos fatores de avanço. Os dados coletados para os cálculos estão apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4.** Dados para os cálculos dos valores teóricos

Parâmetros	Valores
Taxa de remoção de material	$Q_w = 220 \text{ mm}^3/(\text{s}\cdot\text{mm})$ Para aço carbono endurecido (recomendação do fabricante do rebolo)
Largura da zona retificada	$b_w = 60 \text{ mm}$
Diâmetro da peça	$d_w = 40 \text{ mm}$
Largura do rebolo	$b_s = 60 \text{ mm}$
Diâmetro do rebolo	$d_s = 406,4 \text{ mm}$
Velocidade de corte para o rebolo	$V_s = 45 \text{ m/s}$
Relação de velocidade entre o rebolo e a peça	$q_s = 90^*$
Grau de recobrimento (área de contato do dressador durante a dressagem, em relação ao avanço do dressador durante uma volta do rebolo)	$U_d = 9$ (recomendação do fabricante de rebolo)
Profundidade de dressagem	$B_d = 1,2 \text{ mm};$

\*OBS. Segundo Saint-Gobain (2007), existem índices ideais de “ $q_s$ ” onde são diferentes para o ciclo de desbaste (90 até 120), semiacabamento (90) e acabamento (60 até 90), mas para este trabalho foi considerado um valor único para todos os ciclos.

A velocidade de avanço de desbaste ( $v_{fd}$ ) é calculada a partir da Equação 4.1.

$$Q_w \cdot b_s = \pi \cdot b_w \cdot d_w \cdot v_{fd} \quad (4.1)$$

$$v_{fd} = \frac{Q_w \cdot b_s}{\pi \cdot b_w \cdot d_w} = \frac{220 \text{ mm}^3/(\text{s}\cdot\text{mm}) \cdot 60 \text{ mm}}{\pi \cdot 60 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}} = 1,75 \text{ mm/s} = 105 \text{ mm/min}$$

A rotação do rebolo ( $n_s$ ) é calculada a partir da Equação 4.2.

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60000} \quad (4.2)$$

$$n_s = \frac{60000 \cdot V_s}{\pi \cdot d_s} = \frac{60000 \cdot 45 \text{ m/s}}{\pi \cdot 406,4 \text{ mm}} \cong 2115 \text{ rpm}$$

A rotação da peça ( $n_w$ ) é determinada pela Equação 4.3.

$$q_s = \frac{d_s \cdot n_s}{d_w \cdot n_w} \quad (4.3)$$

$$n_w = \frac{d_s \cdot n_s}{d_w \cdot q_s} = \frac{406,4 \text{ mm} \cdot 2115 \text{ rpm}}{40 \text{ mm} \cdot 90} \cong 239 \text{ rpm}$$

Sabendo que a velocidade de avanço é dada por mm/min e a taxa de avanço em mm/volta, basta dividir o valor de vfd (velocidade de avanço de desbaste, Equação 4.1) por  $n_w$  (rotação da peça, Equação 4.3) para encontrar a taxa de avanço de desbaste (fd):

$$f_d = \frac{v_{fd}}{n_w} = \frac{105 \text{ mm/min}}{239 \text{ rpm}} \cong 0,44 \text{ mm/volta}$$

Conforme orientação do fabricante de rebolos (Saint-Gobain), o avanço de semiacabamento ( $f_s$ ) comumente utilizado é 40% do valor do avanço de desbaste (fd), enquanto que o avanço de acabamento ( $f_a$ ) é 10% do valor do fd. Assim adota-se:

$$f_s = 0,20 \text{ mm/volta}$$

$$f_a = 0,05 \text{ mm/volta}$$

O passo de dressagem ( $S_d$ ) é calculado a partir da Equação 4.4.

$$U_d = \frac{B_d}{S_d} \quad (4.4)$$

$$S_d = \frac{B_d}{U_d} = \frac{1,2 \text{ mm}}{9} = 0,13 \text{ mm}$$

Como o passo de dressagem ( $S_d$ ) é dado em mm, para determinar a velocidade de avanço de dressagem ( $v_{Sd}$ ) em mm/min basta multiplicar o valor de  $S_d$  (passo de dressagem, Equação 4.4) por  $n_s$  (rotação do rebole, Equação 4.2):

$$v_{Sd} = S_d \cdot n_s = 0,13 \cdot 2115 \cong 282 \text{ mm/min}$$

A Saint-Gobain (2007) aconselha a utilizar como ciclo de *spark out* 10 a 20 voltas da peça. Adotando 15 voltas, tem-se:

$$\frac{239 \text{ voltas}}{15 \text{ voltas}} = \frac{60 \text{ s}}{S_p} \Rightarrow S_p = \frac{60 \cdot 15}{239} \therefore S_p \cong 3,8 \text{ s}$$

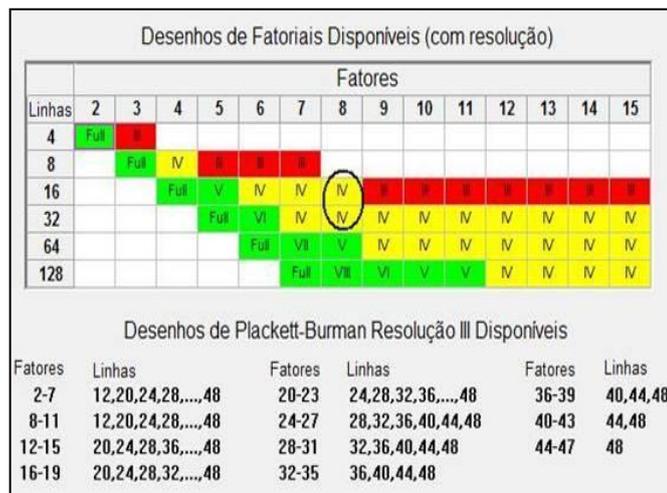
Como um projeto de experimento necessita de no mínimo dois níveis para cada fator, baseado em testes anteriores, decidiu-se pela utilização de valores 50% superior ao calculado para os níveis altos e 50% inferior ao calculado para os níveis baixos. Sendo assim, a Tabela 4.5 apresenta a relação de fatores e seus correspondentes valores de níveis.

**Tabela 4.5.** Tabela de fatores e níveis

Níveis	Fatores							
	SMD [mm]	SMS [mm]	SMA [mm]	fd [mm/volta]	fs [mm/volta]	fa [mm/volta]	Sp [s]	vSd [mm/min]
Alto (+)	0,14	0,10	0,050	0,6	0,3	0,075	5,7	423
Baixo (-)	0,07	0,05	0,025	0,2	0,1	0,025	1,9	141

**4.4.2 Escolha do Projeto de Experimentos**

Para a escolha do projeto fracionado, deve-se saber qual é a resolução (grau de “confundimento”) necessária/ permitida. Baseado no conhecimento empírico do processo pode-se determinar que interações de 3ª ordem podem ser desprezadas. Por isso, para este projeto utilizou-se um projeto de experimento fatorial fracionado do tipo  $2^{8-4}_{IV}$  que é correspondente a uma fração 1/16, com duas replicações. Na Figura 4.5 pode-se verificar a relação entre o número de experimentos, chamadas de rodadas por Montgomery (2001), que se encontram na linha vertical esquerda, o número de fatores, na linha horizontal superior e a resolução correspondente à combinação destes dois nas células coloridas ao centro.



**Figura 4.5.** Tabela de projetos fatoriais em relação à resolução por Software Minitab 14.1.

Assim, pode-se verificar que um experimento com 32 rodadas apresenta a mesma resolução (IV) que um com 16 rodadas. Isto significa que não haverá “confundimento” entre os efeitos principais e as interações de segunda ordem.

### 4.4.3 Montagem do Experimento

Na Figura 4.6 verifica-se a combinação dos 8 fatores. Na Figura 4.7 tem-se a matriz de combinações, em que a ordem é aleatorizada para evitar erros de tendência e repetitividade.

```

Fractional Factorial Design

Factors:      8      Base Design:      8, 16      Resolution:      IV
Runs:        32      Replicates:      2      Fraction:      1/16
Blocks:      1      Center pts (total):      0

Design Generators: E = BCD, F = ACD, G = ABC, H = ABD

Alias Structure (up to order 4)

I + ABCG + ABDH + ABEF + ACDG + ACEH + ADEG + AFGH + BCDE + BCFH + BDFG + BEGH
  + CDGH + CEFG + DEFH

A + BCG + BDH + BEF + CDF + CEH + DEG + FGH
B + ACG + ADH + AEF + CDE + CFH + DFG + EGH
C + ABG + ADH + AEF + BDE + BFH + DGH + EFG
D + ABH + ACF + AEG + BCE + BFG + CGH + EFH
E + ABF + ACH + ADG + BCD + BGH + CFG + DFH
F + ABE + ACD + AGH + BCH + BDG + CEG + DEH
G + ABC + ADE + AFH + BDF + BEH + CDH + CEF
H + ABD + ACE + AFG + BCF + BEG + CDG + DEF

AB + CG + DH + EF + ACDE + ACFH + ADFG + AEGH + BCDF + BCEH + BDEG + BFGH
AC + BG + DF + EH + ABDE + ABFH + ADGH + AEPG + BCDH + BCEF + CDEG + CFGH
AD + BH + CF + EG + ABCE + ABFG + ACGH + AEFH + BCDG + BDEF + CDEH + DFGH
AE + BF + CH + DG + ABCD + ABGH + ACFG + ADFH + BCEG + BDEH + CDEF + EFGH
AF + BE + CD + GH + ABCH + ABDG + ACEG + ADEH + BCFG + BDFH + CEFH + DEFG
AG + BC + DE + FH + ABDF + ABEH + ACDH + ACEF + BDGH + BEFG + CDHG + CEHG
AH + BD + CE + FG + ABCF + ABEG + ACDG + ADEF + BCGH + BEFH + CDHF + DEGH

```

Figura 4.6. *Session* com as combinações de fatores

Para facilitar a execução do experimento, permitindo que as configurações ocorram rapidamente, foram substituídos os níveis “1” e “-1” pelos valores correspondentes.

### 4.4.4 Realização do Experimento

A execução dos experimentos consistiu da retificação por mergulho do diâmetro externo ( $d_w = 40$  mm) de luvas externas de *cardan* feitas de aço SAE1141, temperadas por indução e revenidas com dureza superficial de 50 HRC.

A luva foi fixada entre pontos com o auxílio de uma pinça de rampa (Fig. 4.8), que garante concentricidade entre o diâmetro retificado e o diâmetro menor do entalhado da luva.

Na tentativa de coibir os fatores desgaste dos grãos abrasivos e empastamento do rebolo entre cada ciclo de usinagem, foram realizados dois ciclos de dressagem para limpar totalmente a superfície do rebolo de restos de material e grãos que possam ter sofrido algum tipo de avaria. O processo de retificação dá-se por um único mergulho.

O comprimento retificado da luva  $b_w = 60$  mm (Fig. 4.9) equivale à largura do rebolo ( $b_s$ ) e será o mesmo utilizado para a realização do experimento.

MINITAB - Untitled - [Worksheet 2 \*\*\*]

File Edit Data Calc Stat Graph Editor Tools Window Help

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	vSd	SMD	SMS	SMA	fd	fs	fa	Sp
1	11	1	1	1	141	0.14	0.05	0.050	0.2	0.3	0.075	1.9
2	1	2	1	1	141	0.07	0.05	0.025	0.2	0.1	0.025	1.9
3	2	3	1	1	423	0.07	0.05	0.025	0.2	0.3	0.075	5.7
4	25	4	1	1	141	0.07	0.05	0.050	0.6	0.3	0.025	5.7
5	26	5	1	1	423	0.07	0.05	0.050	0.6	0.1	0.075	1.9
6	20	6	1	1	423	0.14	0.05	0.025	0.6	0.3	0.025	1.9
7	12	7	1	1	423	0.14	0.05	0.050	0.2	0.1	0.025	5.7
8	3	8	1	1	141	0.14	0.05	0.025	0.6	0.1	0.075	5.7
9	31	9	1	1	141	0.14	0.10	0.050	0.6	0.1	0.025	1.9
10	4	10	1	1	423	0.14	0.05	0.025	0.6	0.3	0.025	1.9
11	16	11	1	1	423	0.14	0.10	0.050	0.6	0.3	0.075	5.7
12	8	12	1	1	423	0.14	0.10	0.025	0.2	0.1	0.075	1.9
13	14	13	1	1	423	0.07	0.10	0.050	0.2	0.3	0.025	1.9
14	22	14	1	1	423	0.07	0.10	0.025	0.6	0.1	0.025	5.7
15	15	15	1	1	141	0.14	0.10	0.050	0.6	0.1	0.025	1.9
16	29	16	1	1	141	0.07	0.10	0.050	0.2	0.1	0.075	5.7
17	19	17	1	1	141	0.14	0.05	0.025	0.6	0.1	0.075	5.7
18	23	18	1	1	141	0.14	0.10	0.025	0.2	0.3	0.025	5.7
19	13	19	1	1	141	0.07	0.10	0.050	0.2	0.1	0.075	5.7
20	32	20	1	1	423	0.14	0.10	0.050	0.6	0.3	0.075	5.7
21	21	21	1	1	141	0.07	0.10	0.025	0.6	0.3	0.075	1.9
22	28	22	1	1	423	0.14	0.05	0.050	0.2	0.1	0.025	5.7
23	7	23	1	1	141	0.14	0.10	0.025	0.2	0.3	0.025	5.7
24	24	24	1	1	423	0.14	0.10	0.025	0.2	0.1	0.075	1.9
25	18	25	1	1	423	0.07	0.05	0.025	0.2	0.3	0.075	5.7
26	5	26	1	1	141	0.07	0.10	0.025	0.6	0.3	0.075	1.9
27	30	27	1	1	423	0.07	0.10	0.050	0.2	0.3	0.025	1.9
28	10	28	1	1	423	0.07	0.05	0.050	0.6	0.1	0.075	1.9
29	27	29	1	1	141	0.14	0.05	0.050	0.2	0.3	0.075	1.9
30	9	30	1	1	141	0.07	0.05	0.050	0.6	0.3	0.025	5.7
31	17	31	1	1	141	0.07	0.05	0.025	0.2	0.1	0.025	1.9
32	6	32	1	1	423	0.07	0.10	0.025	0.6	0.1	0.025	5.7

Welcome to Minitab, press F1 for help.

**Figura 4.7.** Valores para o experimento



(a)



(b)

**Figura 4.8.** Pinça de rampa: (a) dispositivo completo; (b) detalhe do dispositivo



**Figura 4.9.** Luva externa retificada: (a) região retificada; (b) detalhe da superfície usinada.

Durante a execução do projeto, as luvas foram retificadas uma a uma sendo a seguir identificadas com uma numeração individual e sequencial na ordem em que foram processadas, para posterior análise de rugosidade. A Figura 4.10 mostra a luva fixada na pinça de rampa, que por sua vez esta fixada entre pontos na retificadora.



**Figura 4.10.** Vista superior da máquina durante o processo de retificação.

#### 4.4.5 Medição da Rugosidade

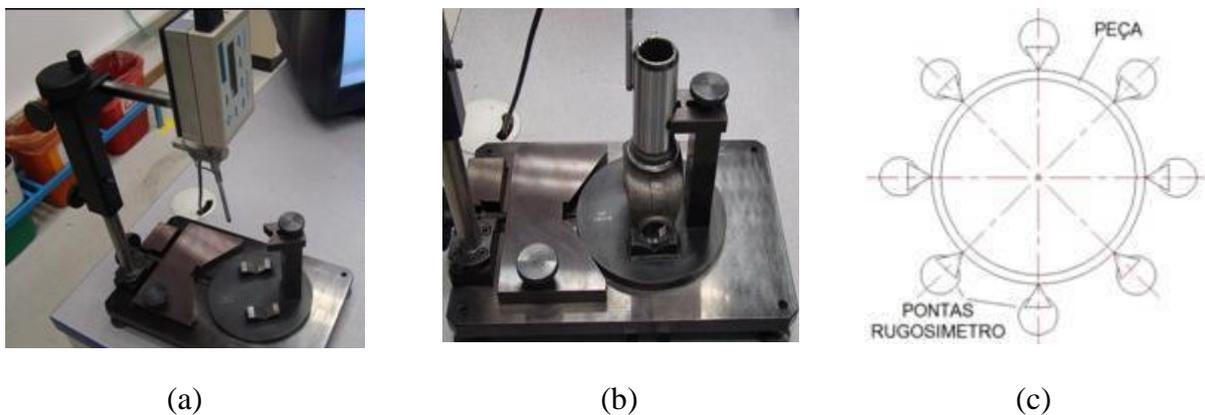
Para a medição da rugosidade foi utilizado o rugosímetro (Fig. 4.11a) com as seguintes características:

- Marca: Taylor Hobson;
- Modelo: Surtronic 3+;
- Resolução: 0,01  $\mu\text{m}$ ;
- Incerteza: 2% da leitura + LSD [ $\mu\text{m}$ ];

- Comprimento de amostragem (*cut-off*): 0,25; 0,8; 2,5 e 8,0 mm;
- Comprimento total de medição: 1,25 a 25 mm;

De acordo com os dados da Tabela 3.1, o *cut-off* escolhido para a realização dos estudos foi  $l_e = 0,8$  mm e o comprimento do percurso de medição foi  $l_m = 5 \times l_e = 4$  mm.

Para auxiliar na medição da rugosidade foi utilizado um dispositivo desenvolvido pelo Departamento de Qualidade da Dana (Fig. 4.11b). Com o dispositivo é possível posicionar as peças de maneira a garantir sempre a mesma condição de medição, como por exemplo, alinhamento do apalpador do rugosímetro com o centro da peça (Fig. 4.11c).



**Figura 4.11.** Sistema de medição: (a) rugosímetro Taylor Hobson; (b) procedimento de medição de rugosidade; (c) representação do apalpador convergindo para o centro da peça.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Coleta dos Valores de Rugosidade

Em função da identificação dos possíveis fatores que podem influenciar na qualidade superficial da peça e do alto número de variáveis contidas no processo (conforme item 4.4.1), os parâmetros que podem ser facilmente controlados a partir do CNC da máquina serão analisados. O valor da rugosidade média ( $R_a$ ) para cada configuração de parâmetros em função do projeto de experimento (ver item 4.4.2) foi coletado e os dados obtidos estão indicados na Tabela 5.1.

### 5.2 Análise dos Dados e Interpretação dos Resultados do Experimento

Pode-se determinar os efeitos principais dos fatores SMD (sobremetal de desbaste), SMS (sobremetal de semiacabamento), SMA (sobremetal de acabamento), fd (avanço de desbaste), fs (avanço de semiacabamento), fa (avanço de acabamento), Sp (*spark out*) e vSd

(velocidade de avanço de dressagem) sobre a rugosidade média  $R_a$  através da utilização do software Minitab 14.1. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.1.** Valores de rugosidade média ( $R_a$ )

Teste	SMD [mm]	SMS [mm]	SMA [mm]	Fd [mm/volta]	Fs [mm/volta]	fa [mm/volta]	Sp [s]	vSd [mm/min]	$R_a$ [ $\mu$ m]
1	0,07	0,05	0,025	0,2	0,3	0,075	5,7	423	0,29
2	0,07	0,05	0,050	0,6	0,1	0,075	1,9	423	0,28
3	0,14	0,05	0,025	0,6	0,1	0,075	5,7	141	0,35
4	0,07	0,05	0,050	0,6	0,3	0,025	5,7	141	0,28
5	0,14	0,05	0,025	0,6	0,3	0,025	1,9	423	0,27
6	0,07	0,05	0,025	0,2	0,1	0,025	1,9	141	0,29
7	0,14	0,05	0,025	0,6	0,1	0,075	5,7	141	0,38
8	0,07	0,10	0,050	0,2	0,3	0,025	1,9	423	0,37
9	0,14	0,10	0,025	0,2	0,3	0,025	5,7	141	0,30
10	0,07	0,05	0,050	0,6	0,3	0,025	5,7	141	0,29
11	0,14	0,10	0,050	0,6	0,3	0,075	5,7	423	0,41
12	0,07	0,10	0,025	0,6	0,3	0,075	1,9	141	0,31
13	0,07	0,10	0,025	0,6	0,3	0,075	1,9	141	0,36
14	0,14	0,10	0,050	0,6	0,3	0,075	5,7	423	0,29
15	0,07	0,10	0,025	0,6	0,1	0,025	5,7	423	0,26
16	0,14	0,10	0,025	0,2	0,3	0,025	5,7	141	0,33
17	0,07	0,10	0,050	0,2	0,1	0,075	5,7	141	0,26
18	0,07	0,10	0,025	0,6	0,1	0,025	5,7	423	0,42
19	0,07	0,05	0,025	0,2	0,3	0,075	5,7	423	0,42
20	0,14	0,05	0,050	0,2	0,3	0,075	1,9	141	0,28
21	0,14	0,10	0,025	0,2	0,1	0,075	1,9	423	0,43
22	0,07	0,05	0,050	0,6	0,1	0,075	1,9	423	0,43
23	0,07	0,10	0,050	0,2	0,1	0,075	5,7	141	0,29
24	0,14	0,05	0,050	0,2	0,1	0,025	5,7	423	0,53
25	0,14	0,05	0,025	0,6	0,3	0,025	1,9	423	0,46
26	0,14	0,10	0,025	0,2	0,1	0,075	1,9	423	0,25
27	0,07	0,10	0,050	0,2	0,3	0,025	1,9	423	0,51
28	0,14	0,10	0,050	0,6	0,1	0,025	1,9	141	0,37
29	0,14	0,05	0,050	0,2	0,1	0,025	5,7	423	0,56
30	0,14	0,05	0,050	0,2	0,3	0,075	1,9	141	0,29
31	0,14	0,10	0,050	0,6	0,1	0,025	1,9	141	0,40
32	0,07	0,05	0,025	0,2	0,1	0,025	1,9	141	0,34

**Tabela 5.2.** Valores dos efeitos principais para  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]

<b>Fatores</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Fatores</b>	<b>Efeitos</b>
Efeito do fator SMD	0,03125	Efeito do fator fs	0,02375
Efeito do fator SMS	0,01125	Efeito do fator fa	0,02375
Efeito do fator SMA	0,02375	Efeito do fator Sp	0,00125
Efeito do fator fd	0,01125	Efeito do fator vSd	0,06625

Fica evidenciado que o fator que apresenta maior efeito sobre a rugosidade é a velocidade de avanço de dressagem (vSd).

Calculando-se o efeito das interações de vSd com os demais fatores através do software Minitab 14.1, os resultados podem ser verificados na Tabela 5.3.

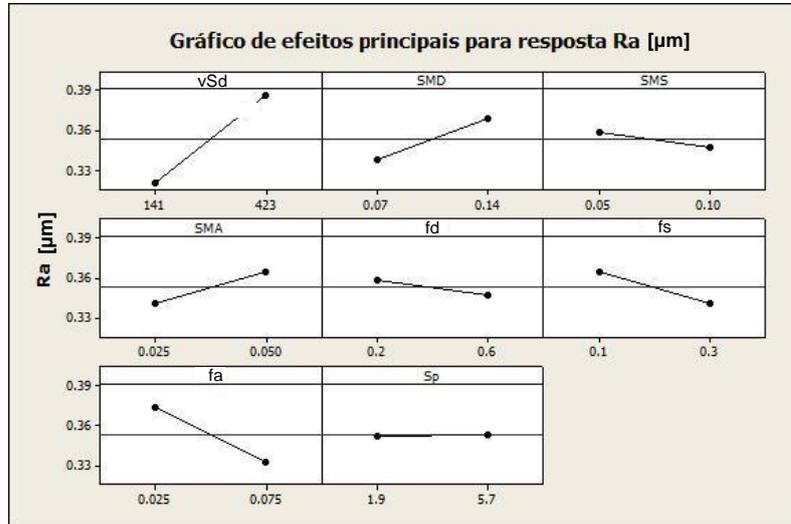
**Tabela 5.3.** Efeitos das interações de vSd com os demais fatores principais

<b>Fatores</b>	<b>Efeitos</b>
Efeito da interação vSd $\times$ SMD	0,00375
Efeito da interação vSd $\times$ SMS	0,02625
Efeito da interação vSd $\times$ SMA	0,04875
Efeito da interação vSd $\times$ fd	0,05625
Efeito da interação vSd $\times$ fs	0,00625
Efeito da interação vSd $\times$ fa	0,03125
Efeito da interação vSd $\times$ Sp	0,02125

Como foi constatado pelos resultados da Tabela 5.2, o fator de maior influência sobre a rugosidade é a velocidade de avanço de dressagem (vSd). A sua interação com outros fatores fica com um efeito muito baixo, comparando com o próprio valor. Estes efeitos podem ser melhores visualizados pelos gráficos da Figura 5.1 construídos com o auxílio do Minitab 14.1. Pode-se ter uma visão geral de todos os fatores sobre a rugosidade. Nela identifica-se que o gráfico correspondente a vSd (velocidade de avanço de dressagem) possui uma inclinação muito maior, quando comparada aos outros efeitos, demonstrando sua grande influência sobre  $R_a$ . Assim, verifica-se que para o nível baixo (vSd = 141 mm/min), a resposta  $R_a \cong 0,33 \mu\text{m}$  e para o nível alto (vSd = 423 mm/min),  $R_a \cong 0,39 \mu\text{m}$ .

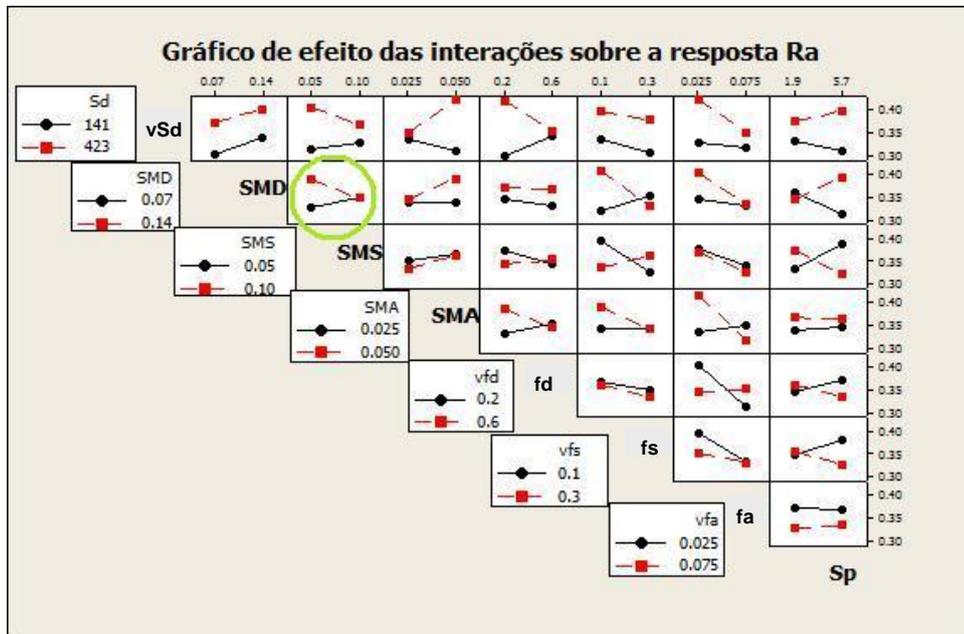
Pela Figura 5.1 pode-se ainda identificar que os efeitos que se seguem são: sobremetal de desbaste (SMD), sobremetal de acabamento (SMA), avanço para acabamento (fa) e avanço para semiacabamento (fs). E por fim os fatores: sobremetal de semiacabamento (SMS),

avanço para desbaste (fd) e *spark out* (Sp), com uma leve inclinação, demonstrando sua pequena influência sobre a qualidade superficial das peças.



**Figura 5.1.** Gráficos dos efeitos principais para a resposta  $R_a$  [µm]

Da mesma maneira que se podem observar graficamente os efeitos principais, consegue-se também, com o auxílio do Minitab 14.1, obter os gráficos de efeito para as interações (Fig. 5.2).



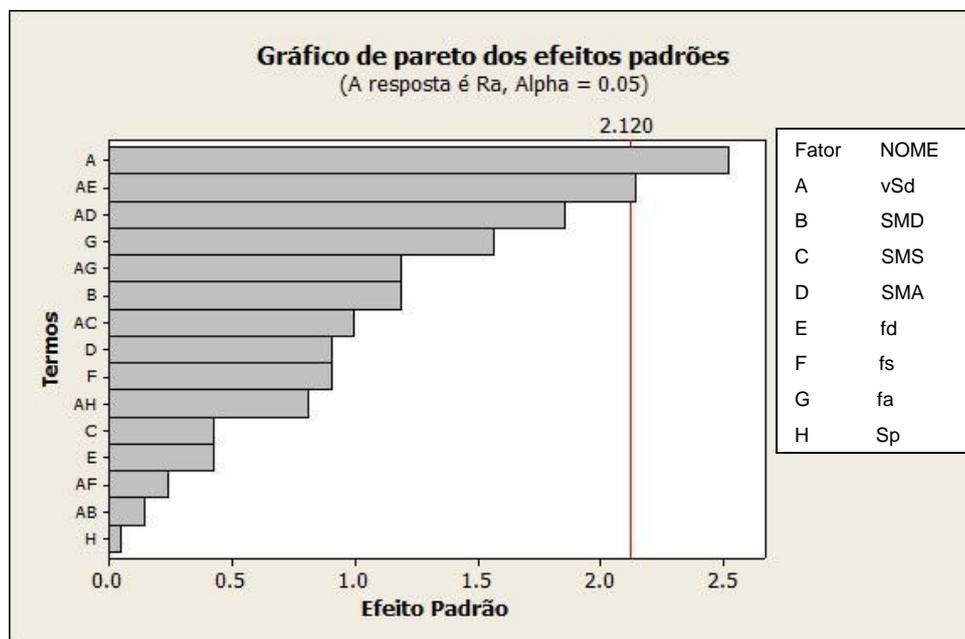
**Figura 5.2.** Gráfico de efeito das interações para  $R_a$  [µm]

Conforme já explanado no item 3.4.6 (b) sobre a análise de interpretação utilizando esta representação gráfica, verifica-se a existência de interação entre os fatores quando as

linhas possuem inclinações opostas, tendo como consequência a alteração da resposta de saída, quando se compara o efeito de dois fatores, isoladamente, com a combinação destes.

Isto significa que, por exemplo, ao analisar a interação entre SMS e SMD, destacada na Figura 5.2, pode-se observar que o fator SMS, quando combinado com o fator SMD de 0,07 mm, tende a aumentar a rugosidade se alterado seu estado de 0,05 mm para 0,10 mm, no entanto seu comportamento se inverte ao ser analisado juntamente com o SMD de 0,14 mm.

O Gráfico de Pareto dos Efeitos Padrões (Fig. 5.3) apresenta o fator Sd (velocidade de avanço de dressagem), como sendo o que apresenta um efeito significativo na rugosidade das peças, seguido da interação vSd x fd, que fica muito próxima à linha de referência.



**Figura 5.3.** Gráfico de Pareto dos efeitos para  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]

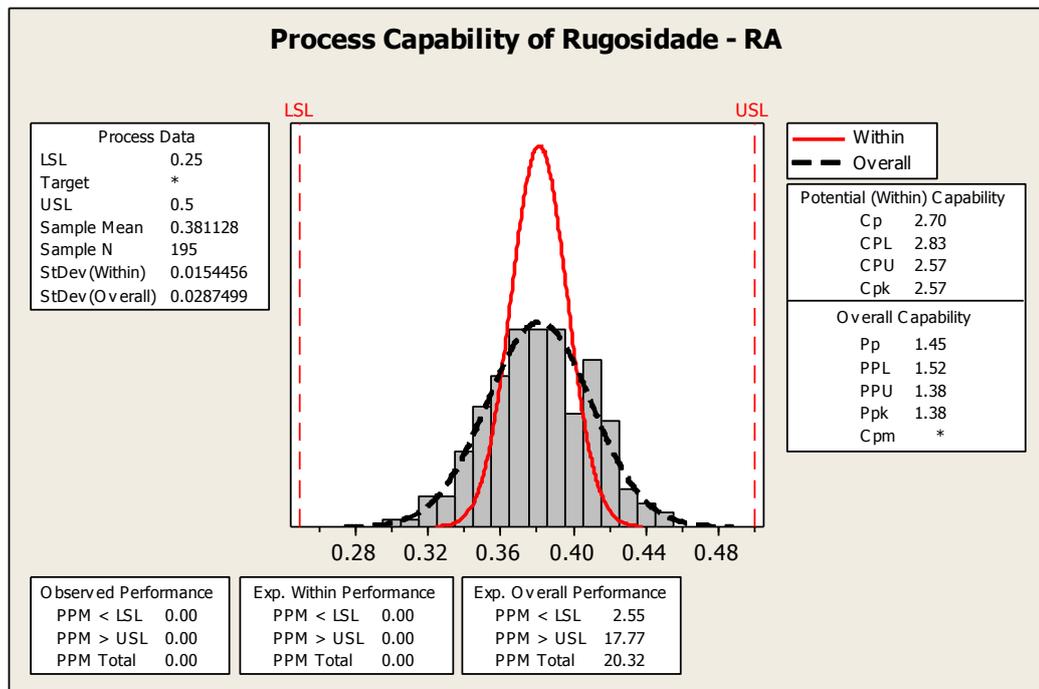
Outra informação importante no gráfico da Figura 5.3 é o valor de efeito de 2,12, referente à diferença dos resultados determinado com o auxílio do programa Minitab 14.1. Os fatores ou suas interações representados pelas colunas com valores abaixo desta linha possuem baixa significância sobre o processo, já as colunas com valores acima se referem aos fatores que apresentam diferença significativa sobre o processo.

A razão pela qual o fator vSd mostra a maior influência sobre  $R_a$  é explicada por Linke (2008), que afirma que o desempenho do processo de retificação depende principalmente da forma em que o rebolo é preparado e/ou dressado, sendo que a topografia do rebolo influencia na rugosidade.

### 5.3 Testando as Variáveis

O programa CNC da retificadora foi modificado considerando os dados obtidos nos experimentos visando melhorar a condição de capacidade do processo quanto ao acabamento superficial da peça. Assim, pretende-se melhorar o desempenho da operação de retificação do diâmetro externo da luva da *cardan* considerando como variável de resposta a rugosidade  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ].

Na Figura 5.4 pode ser observado o desempenho da retificadora através do estudo de capacidade de rugosidade  $R_a$  após a modificação no programa CNC. Utilizou-se velocidade de avanço de 141 mm/min e reduziu-se o sobrematerial de acabamento, possibilitando a redução na frequência de dressagem do rebolo.



**Figura 5.4.** Estudo de capacidade para a característica de rugosidade do diâmetro externo da luva retificada após parâmetros alterados via Minitab.

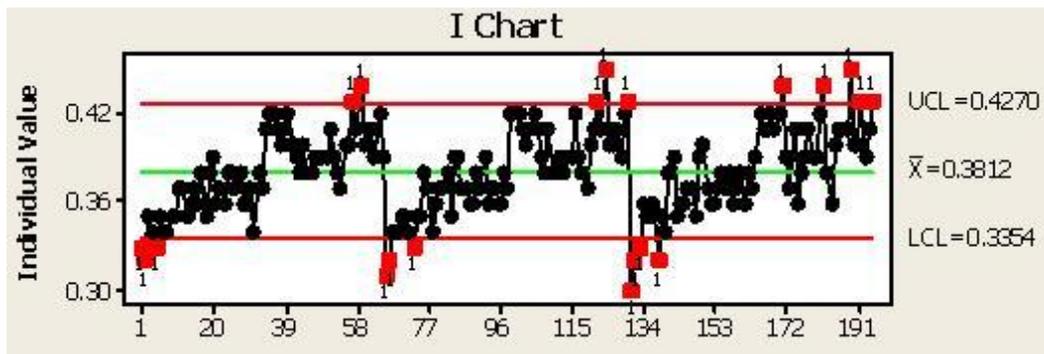
Conforme critério do Manual do CEP (2005), para a tolerância de 0,25 – 0,50  $R_a$ , o processo apresentou capacidade potencial quando avaliados os índices de capacidade de  $C_p = 2,70$  e  $C_{pk} = 2,57$  (Fig. 5.4), pois anteriormente ao estudo o processo apresentava índices de  $C_p = 1,57$  e  $C_{pk} = 1,55$  (Fig. 1.4).

Ao avaliar a capacidade do processo, percebe-se uma considerável melhoria (antes,  $P_p = 0,64$  e  $P_{pk} = 0,63$ ), porém não a ponto de definir o equipamento como capaz em longo

prazo, pois seus índices de desempenho ainda permanecem abaixo de 1,67 (agora,  $Pp = 1,45$  e  $Ppk = 1,38$ ).

Outro ponto importante a ser ressaltado é referente à diminuição da dispersão dos dados e a conseqüente redução do índice de  $PPM$ : antes eram 55490  $PPM$  (Fig. 1.4); depois passou para 20,32  $PPM$  (Fig.5.4); isto reduziu o índice de sucata durante a execução desta operação, porém sem a possibilidade de eliminar a medição 100% na fabricação das peças na célula de produção.

Através de ajustes na programação da máquina CNC, foi possível a otimização do processo quanto à quantidade de peças por dressagem: antes era feita a cada 23 peças (Fig. 1.5), passando para cada 65 peças (Fig. 5.5), aumentando assim a taxa de saída do equipamento e reduzindo o custo da operação. A redução na frequência de dressagem foi possível em função da redução da dispersão do processo.



**Figura 5.5.** Valores individuais de rugosidade em um período de três dressagens do rebolo

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu correlacionar alguns parâmetros de corte de um processo de retificação cilíndrica com o acabamento superficial de peças endurecidas de aço carbono. E de posse dos resultados obtidos pelo projeto de experimentos executado, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- A velocidade de avanço de dressagem ( $v_{Sd}$ ) é o fator que causa maior impacto na rugosidade superficial ( $R_a$ ), havendo interação entre este e o sobremetal de semiacabamento (SMS), sobremetal de acabamento (SMA), avanço de desbaste ( $fd$ ), avanço de acabamento ( $fa$ ) e *spark out* ( $Sp$ ). Observou-se que não há efeito significativo destas interações sobre o processo, com exceção da interação  $v_{Sd} \times fd$ .
- Assim como em  $v_{Sd}$ , o sobremetal de desbaste (SMD) também mostrou uma tendência de aumentar a rugosidade média  $R_a$  quando analisado pelo gráfico de efeitos principais (Fig. 5.1), mas mostrou uma participação não significativa no resultado, pois a barra correspondente a este fator não chega à linha de referência (Fig. 5.3). Pode-se verificar ainda a correlação com todas as outras variáveis, à exceção do avanço de desbaste ( $fd$ ), mas nenhuma das interações mostrou influenciar no processo (Fig. 5.2).
- Assim como SMD, o SMA revelou a mesma tendência sobre a rugosidade da peça, aumentando o valor de  $R_a$  para o nível mais alto, mas não apresentando influência sobre a qualidade superficial da peça.
- Os avanços de desbaste ( $fd$ ), semiacabamento ( $fs$ ) e acabamento ( $fa$ ) não apresentaram influência sobre a rugosidade, que são as irregularidades micrométricas que se formam na superfície da peça durante o processo de usinagem e que podem ser causadas por folgas nos eixos, irregularidades no movimento da mesa, desbalanceamento do rebolo e granulação do abrasivo segundo Stemmer (1995).
- O tempo de faiscamento (*spark out*) não apresentou nenhuma importância sobre a rugosidade média ( $R_a$ ) da peça dentro da faixa analisada neste trabalho (de 1,9 a 5,7 s). Apesar disto, Marinescu *et al.* (2007) alerta que tempos muito elevados de *spark out* podem prejudicar o acabamento superficial da peça, devido ao alto tempo de atrito entre a peça e a ferramenta sem que haja corte, gerando atrito e calor.

O aprofundamento do assunto propiciará outras oportunidades de trabalho, tanto pela complexidade do tema quanto pela escassez de profissionais nesta área. Será possível estudar novos fatores como o tipo de rebolo, o sistema de refrigeração, o tipo de fluido refrigerante, as vibrações externas e da máquina ferramenta que influenciam no desempenho do processo.

## 7. REFERÊNCIAS

### 7.1 Citadas

Bianchi, E. C. **Ação das condições de dressagem na retificação de precisão**. São Carlos, Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990.

Blanch, M. F. **Abrasivos**. Barcelona: Editora Marcombo, 1979, 316p.

Callister Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.

Dana Corporation. Disponível em: *www.dana.com*. Acesso em: 30.jun.2008.

Decker, D. **The dana heritage**. Washington, DC: Editado por The History Factor, 1997 /não paginado/.

Hassui, A.; Diniz, A. E. **Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.43, No.8, pp. 855–862.

König, W. **Retificação, brunimento e lapidação**. Tradução de Weingaertner, Walter. Florianópolis: UFSC, 1980c, 342p. Título original: Fertingungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läpen.

Linke, B. **Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels: CIRP Annals – Manufacturing Technology**, Vol.57, No.1, 2008, pp. 345-348.

Malkin, S. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1989, 275p.

Manual do CEP. Publicado por Chrysler, Ford Motor Company e General Motors Corporation, AIAG, 2008.

Marinescu, I. D. et al. **Handbook of machining with grinding wheels**. New York: Editora CRC: Taylor & Francis Group, 2007, 596p.

Minitab 14.1. Disponível em: *www.minitab.com*. Acesso em: 23.nov.2012.

Montgomery, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2001, 684p

Montgomery, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004, 513p.

Moore, D. S.; McCabe, G. P. **Introduction to the practice of statistics**. 3 ed. New York: W. H. Freeman & Company, 1998, 825p.

NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições, e parâmetros da rugosidade: NBR ISO 4287**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002, 18p.

NBR ISO 8404. **Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**: NBR 8404:1984. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

Nussbaum, G. C. **Rebolos & abrasivos**: Tecnologia básica, 3v., São Paulo: Editora Ícone, 1988.

Oberg, E. **Machinery's handbook**. 25ed. New York: Industrial, 1996, 2547p.

PwC LLP. **Apostila de formação de black belt**: Módulo III – Analisar, D.O.E - Planejamento de Experimentos, Price Waterhouse e Coopers & Lybrand. 2001 /paginação irregular/.

Rebrac. Instrumentos de Medição. **Rugosidade: parâmetros**. Disponível em: [www.rebrac.com.br/downloads/RUGOSIDADE -parâmetros-.pdf](http://www.rebrac.com.br/downloads/RUGOSIDADE-parâmetros-.pdf). Acesso em 20.Out.2012.

Saint-Gobain Abrasives. **Tecnologia de retificação I**. 2007. Vinhedos /paginação irregular/.

Sevin, R. **Universal joint and driveshaft**. Warrendale: SAE, 1979, 440p

SAE – Society of Automotive Engineers **Handbook**, 1992.

Stemmer, C. E. **Ferramentas de corte II**: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos. 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995, 314p.

## 7.2 Consultadas

Colpaert, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1974, 412p.

Dana Indústrias Ltda. **Catálogo de aplicações dos eixos cardan e componentes**. São Paulo: Dana Indústrias Ltda., 2001 /não paginado/.

Ferraresi, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**, v.1, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1970.

Freire, J. M. **Tecnologia mecânica: máquinas limadoras e retificadoras**, v.5, Rio de Janeiro: LTC Editora, 1975.

Ishikawa, K. **Guide to quality control**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986, 226p.

Schaeffer, R. L.; McClave, J. T. **Probability and statistics for engineers**. 4<sup>th</sup> ed. California: Duxbury Press, 1995, 745p.

SPC, **Statistical process control**. USA: Automotive Industry Action Group, 2005.

Wekema, M. C. C.; Aguiar, S.. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Ed. Littera Maciel Ltda., 1996.