

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ADRIANO MENEZES DA SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NITRETO DE BORO HEXAGONAL
NA USINABILIDADE DE LIGA DE AÇO RÁPIDO SINTERIZADO**

SÃO LEOPOLDO
2011

ADRIANO MENEZES DA SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NITRETO DE BORO HEXAGONAL
NA USINABILIDADE DE LIGA DE AÇO RÁPIDO SINTERIZADO**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico, pelo curso de
Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.**

Orientador: Prof. M.Sc Dilson José Aguiar de Souza

SÃO LEOPOLDO

2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor Msc. Dilson José Aguiar de Souza pela oportunidade de me orientar na conclusão deste trabalho, perdendo momentos em casa com a família para poder estar presente e me ajudar na realização dos ensaios, além de me auxiliar com muita paciência.

Aos meus pais, Rubem Farias da Silva e Regina Cirinéia Menezes da Silva, por terem me dado força e sustentabilidade financeira no início do curso para chegar a esse momento. Aproveito também a oportunidade para agradecer todo o aporte que me deram em casa e o amor dedicado.

Aos meus irmãos Ana Paula Menezes da Silva e Alexandre Menezes da Silva pelas oportunidades de aprendizagem e troca de experiências.

À minha namorada Nicole Luise Fröhlich Kunsler pela dedicação oferecida, pelos momentos de companheirismo e pela compreensão aos momentos de ausência.

À empresa BLEISTAHL BRASIL METALURGIA S/A, em especial ao funcionário Manfred Kunrath, pela oportunidade de realizar o trabalho de conclusão com materiais fornecidos pela empresa, além de dar aporte financeiro para aquisição de materiais de apoio para a realização dos ensaios.

À empresa LESI Comércio e Representações LTDA, em especial a Fernando Mattes, representante na região da empresa SECO TOOLS que cedeu as ferramentas de corte para os ensaios.

Agradeço à UNISINOS pela cessão dos laboratórios da universidade e ao corpo de funcionários da casa, principalmente aos que me deram apoio e auxílio quando possível e sempre que necessário.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo analisar a influência da adição de Nitreto de Boro em forma Hexagonal (HBN) em uma liga de Aço Rápido Sinterizado de uma guia de válvula para motores de combustão interna. Adicionou-se à liga original HBN na mistura do pó de sinterização em percentuais de 0,05, 0,10, 0,15 e 0,20%. Os resultados que serviram como base de dados foram obtidos através de ensaios de torneamento em máquina CNC. Utilizou-se como ferramenta de corte em todos os ensaios insertos com geometria VBMT 160404-F1, classe CP500, em suporte SVJBL 2020K16. Cada composição foi separada em três lotes diferentes e utilizada em cada lote ensaiado pontas de ferramenta diferentes. Verificou-se alteração na microestrutura das amostras, porém as diferenças não podem ser notadas com muita facilidade pelas imagens geradas em micrografia. Observou-se através de ensaios de dureza que a adição do HBN tende a diminuir a dureza do material. Analisaram-se os dados de três formas: medição das componentes de força de usinagem (força de corte $[F_c]$, força de avanço $[F_f]$ e força passiva $[F_p]$), medição do desgaste de ferramenta e medição da rugosidade da superfície usinada. Através dos dados das componentes de força de Usinagem $[F_u]$ verificou-se que a liga com HBN com percentual de 0,20% apresentou melhores resultados. Com relação ao desgaste de ferramenta a liga original apresentou melhores resultados quando comparada com as outras ligas. Já entre as ligas modificadas a que apresentou melhores resultados foi a liga 0,20%HBN, com valores bem próximos aos da liga original. A rugosidade R_a medida nos ensaios mostra que a liga original apresentou os melhores resultados. Com base nos dados obtidos sugere-se um ensaio mais aprofundado entre as ligas original e 0,20%, além da realização de testes nos motores para verificar a influência da redução de dureza na resistência ao desgaste da guia de válvula e na vida da válvula.

Palavras chave: Nitreto de Boro Hexagonal, usinagem de aço rápido sinterizado, força de usinagem e desgaste de ferramenta.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação do uso de matéria prima e energia entre processos concorrentes..	16
Figura 2 - Peças sinterizadas	17
Figura 3 - Esquema de alimentação de pó na matriz.	18
Figura 4 - Representação esquemática das etapas do processo de MP.	19
Figura 5 - Densificação.....	20
Figura 6 - Distribuição da produção de peças por MP no mercado mundial.....	21
Figura 7 - Processos de fabricação.....	22
Figura 8 - Processos usuais de torneamento.....	23
Figura 9 - Parâmetros de corte e superfícies na peça.....	25
Figura 10 - Geometria da ferramenta de corte.....	25
Figura 11 - Relações de entrada e saída no torneamento.....	26
Figura 12 - Geometria da ferramenta.....	28
Figura 13 - Desgaste frontal ou de flanco.....	37
Figura 14 - Desgaste de cratera.....	37
Figura 15 - Deformação plástica.....	38
Figura 16 - Lascamento do inserto.....	38
Figura 17 - Trincas de origem térmica (a) e trinca de origem mecânica (b).....	39
Figura 18 - Desgaste de ferramenta.....	41
Figura 19 - força de Usinagem e suas componentes.....	44
Figura 20 - Variação de K_s com o avanço.....	45
Figura 21 - Variação de K_s com a profundidade de corte.....	45
Figura 22 - Torneamento de peça fabricada pela MP.....	47
Figura 23 - Parâmetros de rugosidade R_a	49
Figura 24 - Rugosidade R_a nos processos de fabricação.....	50
Figura 25 - Sede da empresa em Cachoeirinha-RS.....	52
Figura 26 - Ítens fabricados pela Bleistahl Brasil.....	53
Figura 27 - Montagem de uma guia de válvula no bloco de motor.....	54
Figura 28 - Guia com desgaste excessivo.....	55
Figura 29 - Entrada de óleo no momento da sucção.....	55
Figura 30 - Entrada de óleo no momento da exaustão.....	56
Figura 31 - Torno MAZAK QT10 usado para os ensaios.....	57
Figura 32 - Sistema de fixação na placa do torno.....	58
Figura 33 - Imagem das castanhas adaptáveis montadas no torno.....	58
Figura 34 - Sistema de fixação da plataforma piezelétrica.....	58

Figura 35 - Simulação no SolidWorks2010® para verificação de colisões.	59
Figura 36 - Durante o ensaio não houve colisão.	59
Figura 37 - Plataforma piezelétrica utilizada nos experimentos.	60
Figura 38 - Amplificadores de sinais.....	61
Figura 39 - Placa de aquisição de dados NI6009.....	61
Figura 40 - Suporte SVJBL2020K16 fabricado.....	62
Figura 41 - Características e dimensões da pastilha VBM 160404 – F1.	63
Figura 42 - Classes de MD da SECO TOOLS.....	63
Figura 43 - Estrutura do revestimento da classe CP500.....	64
Figura 44 - Elementos químicos presentes na classe CP500.	64
Figura 45 - Esquema do sistema de aquisição de dados de força.	65
Figura 46 - Exemplo de gráfico gerado na aquisição de F_c , F_f e F_p , liga original.....	66
Figura 47 - Simulação da área sendo usinada, em <i>software</i> SolidWorks2010®.....	66
Figura 48 - Desgaste de cratera, lote original ao final de 120 peças (Zoom – 155x).	67
Figura 49 - Sistema para medição do desgaste.	68
Figura 50 - Instrumento utilizado para calibração do <i>software</i> DinoCapture® 2.0.	68
Figura 51 - Medição de desgaste máximo de flanco em <i>software</i> DinoCapture® 2.0.....	68
Figura 52 - Durômetro Brinell/Vickers utilizado no ensaio.....	71
Figura 53 - Politriz PANTEC utilizada para o polimento das amostras.	72
Figura 54 - Microscópio Union Versamet II utilizado na captura de imagens das amostras.	73
Figura 55 - Microestrutura sinterizado 0,05% HBN - Zoom 340x.....	73
Figura 56 - Microestrutura sinterizado 0,10% HBN - Zoom 340x.....	74
Figura 57 - Microestrutura sinterizado 0,15% HBN - Zoom 340x.....	74
Figura 58 - Microestrutura sinterizado 0,20% HBN - Zoom 340x.....	75
Figura 59 - Microestrutura sinterizado original - Zoom 340x.....	75
Figura 60 - Sistema montado para medir rugosidades.....	76
Figura 61 - Comportamento de forças registradas durante ensaio de teste com SAE 1045.	77
Figura 62 - Desgaste em liga 0,05% HBN, lote 01 com 20 peças usinadas (Zoom 82x).....	84
Figura 63 - Desgaste em liga 0,05% HBN, lote 01 com 120 peças usinadas (Zoom 82x).....	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Média das durezas das amostras.	71
Gráfico 2 - Média dos dados de força de corte.....	79
Gráfico 3 - Média dos dados de força de avanço.	81
Gráfico 4 - Média dos dados de força passiva	82
Gráfico 5 - pressão específica de corte.	83
Gráfico 6 - Média dos valores de VB_{Bmax} das amostras.	85
Gráfico 7 - Média dos valores de Ra	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Causas e ações para evitar desgastes e avarias na ferramenta.	40
Quadro 2 - Forma do quebra-cavaco e faixa de avanço.	62
Quadro 3 - Nomenclatura das amostras.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influência dos ângulos de saída e inclinação no torneamento.....	28
Tabela 2 - Aplicações do MD, segundo norma ISO 513:2004	31
Tabela 3 - Parâmetros de corte empregados nos ensaios.....	65
Tabela 4 - Dimensional dos corpos de prova.	70
Tabela 5 - Medição da dureza das amostras.	71
Tabela 6 - Média dos dados de força de corte em N.....	79
Tabela 7 - Média dos dados de força de avanço em N.	80
Tabela 8 - Média dos dados de força passiva em N.	82
Tabela 9 - pressão específica de corte pelas médias de F_c em (N/mm ²).	83
Tabela 10 - Média do desgaste VB_{Bmax} das amostras, em mm.....	85
Tabela 11 - Valores médios de R_a em μm	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MP – Metalurgia do Pó

ARS – Aço Rápido Sinterizado

HBN – Nitreto de Boro Hexagonal

B – Boro

CNC – Comando Numérico Computadorizado

W – Tungstênio

MD – Metal duro

CBN – Nitreto Cúbico de Boro

HSS – High Speed Steel (Aço Rápido)

C – Carbono

Co – Cobalto

WC – Carboneto de Tungstênio

Fe – Ferro

TiC – Carboneto de Titânio

Ti – Titânio

TaC – Carboneto de Tântalo

Ta – Tântalo

NbC – Carboneto de Nióbio

Nb – Nióbio

TiN – Nitreto de Titânio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

TiCN – Carbonitretos de Titânio

CERMET – cerâmica + Metal

APC – Aresta Postiça de corte

CN – Comando Numérico

F⁰F⁰ – Ferro Fundido

pC – Pico Coulomb

Cr – Cromo

CETEMP – Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão

Picral3% – solução aquosa de ácido pícrico a 3%

Nital3% – solução aquosa de ácido nítrico a 3%

SAE – Society of Automotive Engineers (EUA)

LISTA DE SÍMBOLOS

F_c – força de corte (N)
 F_f – força de avanço (N)
 F_p – força passiva (N)
 VB_{Bmax} – desgaste máximo de flanco (mm)
 R_a – Rugosidade média (μm)
 R_y – Rugosidade máxima (μm)
 R_z – Rugosidade de profundidade média (μm)
 R_{3z} – Rugosidade média do terceiro pico e vale (μm)
 v_c – velocidade de corte (m/min)
 f – avanço (mm/rot)
 a_p – profundidade de corte (mm)
 Q – Taxa de remoção momentânea de material (cm^3/min)
 A_γ – Superfície de saída da ferramenta
 S' – Aresta secundária de corte
 $A'\alpha$ – Superfície secundária de folga
 $A\alpha$ – Superfície principal de folga
 r_ϵ – Raio de quina da ferramenta (mm)
 γ_0 – ângulo de saída da ferramenta ($^\circ$)
 λ – ângulo de inclinação ($^\circ$)
MPa – MegaPascal (N/mm^2)
HRC – Unidade de dureza Rockwell em escala C
 VB_B – desgaste de flanco
KT – profundidade da cratera
KB – largura da cratera
KM – distância do centro da cratera à aresta de corte
 F_u – força de Usinagem (N)
 F_t – força ativa de corte (N)
 K_s – pressão específica de corte (N/mm^2)
 A – Seção de corte (mm^2)
 P_c – Potência de corte (kW)
 P_f – Potência de avanço (kW)
 v_f – velocidade de avanço (mm/min)

y_1 – ordenadas de afastamento (mm)

l_m – percurso de medição (mm)

F_x – força na direção do eixo X

F_y – força na direção do eixo Y

F_z – força na direção do eixo Z

grãos/in² – granulometria das lixas

μm – micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.2	ORIGEM DA PESQUISA.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.4	METODOLOGIA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	O PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ.....	16
2.1.1	Funcionamento.....	17
2.1.1.1	Moldagem ou compactação.....	17
2.1.1.2	Sinterização	18
2.1.2	Limitações e vantagens do processo	20
2.1.3	Principais aplicações	21
2.1.4	Questões ambientais do processo	22
2.2	PROCESSOS DE USINAGEM	22
2.2.1	Processo de Torneamento.....	23
2.2.1.1	Material da peça	26
2.2.1.2	Geometria da peça	27
2.2.1.3	Geometria da ferramenta.....	27
2.2.1.4	Parâmetros de corte	29
2.2.2	Ferramentas de Usinagem	29
2.2.2.1	Metal Duro	30
2.2.2.2	Cerâmica.....	33
2.2.2.3	CERMET (cerâmica + Metal)	34
2.2.2.4	Diamante.....	35
2.2.2.5	Diamante Policristalino	35
2.2.2.6	CBN (Nitreto Cúbico de Boro).....	36
2.2.3	Desgaste e avarias na aresta de ferramenta de corte	36
2.2.3.1	Medição dos desgastes da ferramenta.....	40
2.2.3.2	Critério de vida da ferramenta de corte	41
2.2.4	Forças de corte	43
2.2.5	Potências de usinagem	46
2.2.6	Usinagem de Aço Rápido Sinterizado em torneamento	47
2.2.7	Usinabilidade.....	47
2.2.8	Rugosidade da superfície	48
3	PROPOSTA DE TRABALHO DA EMPRESA.....	52
3.1	A EMPRESA.....	52
3.2	PEÇAS PRODUZIDAS PELA EMPRESA	53
3.2.1	Anel sede de válvula.....	53
3.2.2	Guia de válvula.....	54
4	METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	57
4.1	TORNO CNC	57
4.1.1	Castanhas adaptáveis	57

4.2	PLATAFORMA PIEZELÉTRICA.....	60
4.3	AMPLIFICADORES DE SINAIS	60
4.4	PLACA DE AQUISIÇÃO	61
4.5	SUPOORTE E INSERTOS.....	62
4.5.1	Suporte	62
4.5.2	Inserto.....	62
4.6	PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS	64
4.7	MEDIÇÃO DA FORÇA DE CORTE, FORÇA DE AVANÇO E FORÇA PASSIVA.....	65
4.8	MEDIÇÃO DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS.....	66
4.8.1	Microscópio.....	67
4.9	MATERIAIS ENSAIADOS.....	69
4.9.1	Corpos de Prova	69
4.9.1.1	Controle dimensional das peças.....	70
4.9.1.2	Medição de dureza	70
4.9.1.3	Análise micrográfica.....	72
4.9.1.4	Medição da rugosidade Ra	76
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
5.1	MEDIÇÃO DE FORÇAS	78
5.1.1	Força de corte	78
5.1.2	Força de avanço.....	79
5.1.3	Força passiva.....	81
5.2	PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE.....	82
5.3	MEDIÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO.....	83
5.4	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE RA	86
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	90
	ANEXO 1.....	93
	ANEXO 2.....	94
	ANEXO 3.....	95
	ANEXO 4.....	105
	ANEXO 5.....	110

1 INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica vem crescendo sua produção consideravelmente nas últimas décadas. Dentre as áreas que se destacam, a Metalurgia do Pó (MP) está inclusa. Este processo vem crescendo principalmente devido a obtenção de peças com geometria definitiva e também com tolerâncias apertadas.

Sabe-se que uma das principais virtudes do processo de MP é poder unir materiais metálicos a não-metálicos em um único processo. Como atualmente o mundo globalizado necessita redução da geração de resíduos, o processo ganha vantagem em relação aos demais gerando poucos resíduos e agredindo pouco o meio ambiente. Além da virtude de ser um processo com controle elevado de composição, umidade e densidade ele garante uma microestrutura bastante homogênea.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.

Este estudo foi motivado em função da necessidade de criação de uma nova liga de Aço Rápido Sinterizado (ARS). Atualmente, a ferramenta utilizada em uma das etapas do processo de usinagem da liga em uso está sofrendo avarias. Segundo a norma ISO 3685:1993 essa avaria pode ocorrer devido a vários fatores, sendo que um deles é relativo à alta taxa de desgaste da ferramenta.

Peças feitas de ARS geralmente têm sua usinagem complexa, pois apresentam altas taxas de abrasividade, ocasionando um desgaste excessivo da aresta de corte da ferramenta.

1.2 ORIGEM DA PESQUISA

O estudo de novas ligas metálicas exige um grande investimento de tempo e maquinário para a realização dos ensaios, além de exigir um grau de comprometimento das empresas em desenvolver esses estudos. É nesse momento que universidades e escolas apóiam os estudos, pois possuem pessoal capacitado e normalmente disponível para estas atividades de pesquisa. As propostas podem ser feitas através de projetos de pesquisa ou através do oferecimento do tema para trabalhos de conclusão de curso.

Buscando uma parceria, entrou-se em contato com a empresa Bleistahl Brasil Metalurgia S/A que atualmente detém boa parte do mercado de componentes sinterizados a qual propôs o estudo de uma nova liga de ARS que tinha como principal objetivo buscar uma melhor usinabilidade de seu componente. Esta liga foi criada pelo seu quadro funcional de engenheiros com base em estudos já feitos com outras ligas. Para esse estudo, a empresa criou 4 variações diferentes para o ARS pela variação do Nitreto de Boro hexagonal (HBN) na sua composição química, para serem avaliadas nos ensaios.

1.3 OBJETIVOS

Tem-se como principal objetivo do trabalho avaliar o desempenho de cada liga citada no item 1.2 através do ensaio de usinabilidade, por torneamento em uma máquina por Comando Numérico Computadorizado (CNC). Para isso será utilizada uma metodologia capaz de determinar qual a liga apresenta melhor comportamento através da medição das componentes de forças de usinagem (F_c , F_f e F_p), medição e acompanhamento da evolução do desgaste máximo de flanco (VB_{Bmax}) e monitoramento da rugosidade R_a das amostras.

1.4 METODOLOGIA

Para a execução dos ensaios foi necessário projetar um sistema para fixação das peças na castanha do torno, além de um sistema para fixação da torre piezelétrica que faz a captação das componentes em X, Y e Z da força que atua na usinagem durante o processo.

Foi doado pela empresa um total de 400 peças de cada amostra com composição química diferente. Assim, fez uma divisão em 3 lotes de 120 peças cada para trabalhar-se então com as médias, pois utilizando um ensaio de 400 peças para cada amostra os dados poderiam não se tornar confiáveis.

Foi realizado acompanhamento da evolução das componentes da força de usinagem com o desgaste de flanco utilizando microscópio com capacidade de capturar imagens através de seu *software* e efetuar as medições de desgaste.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ.

Nesta etapa da revisão será focado apenas em questões que tratem de ARS, pois a gama de aplicações do processo de metalurgia do pó (MP) é vasta. Sabe-se que o processo pode ser feito com materiais metálicos e também não-metálicos, inclusive na mesma matriz, devido à ausência de fase líquida no processo.

Segundo Stemmer (2005), o surgimento da MP veio da necessidade da fusão do Tungstênio (W), cujo ponto de fusão é de 3387 °C. Como não se existia cadinhos de metal capazes de suportar essa temperatura foi criado o processo de sinterização.

O processo de MP vem crescendo muito nos últimos anos, o qual pode produzir peças já em sua forma final, ou muito próxima dela. Dificilmente uma peça feita pelo processo de sinterização passa por uma próxima etapa para sofrer usinagem, por exemplo. Pode-se observar pelos dados da Figura 1 que a MP tem grande parte da sua matéria-prima utilizado no processo, com pouca perda de material. Tolerâncias dimensionais também são conseguidas de forma muito apertada já que o processo permite adaptação com calibrações que são feitas ainda nas peças de *setup* e ajuste da matriz. Outro fator que faz o processo crescer é a capacidade de obtenção de peças que não conseguiriam ser produzidas por outro processo, devido à sua grande complexidade (DELFORGE, 2007 *et al.*).

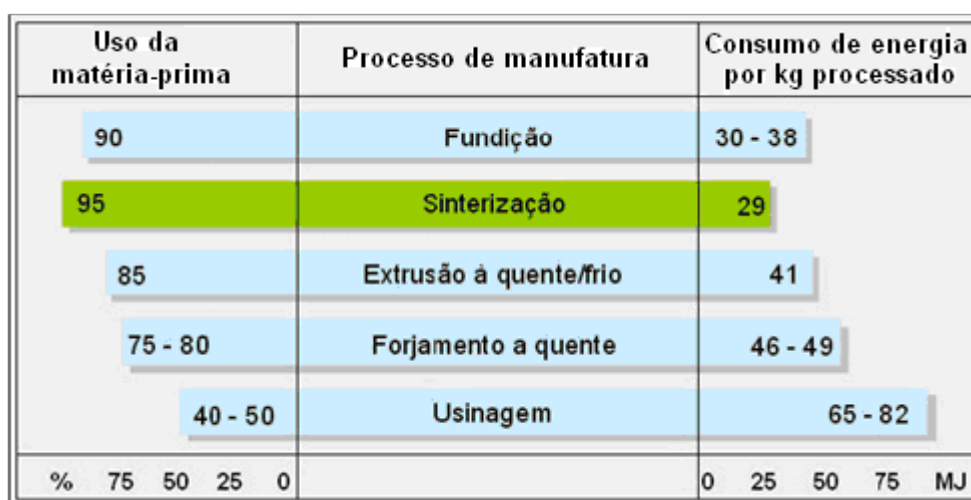


Figura 1 - Comparação do uso de matéria prima e energia entre processos concorrentes.
Fonte: Grupo setorial metalurgia do pó, 2009

As aplicações da MP são variadas e as que recebem maior destaque são: na indústria automobilística, na informática, na aeroespacial, no de material eletroeletrônico, no de equipamentos, no de implementos agrícolas e no têxtil, dentre uma infinidade de outros.

Segundo Dias (2011) o processo apresenta uma porosidade variando de 5 a 25%. Esses valores estão diretamente relacionados com a pressão de compactação exercida durante o processo de fabricação. Pode-se observar na Figura 2 alguns modelos de peças fabricados pelo processo da MP.



Figura 2 - Peças sinterizadas
Fonte: Combustol, 2011

2.1.1 Funcionamento.

Segundo Delforge (2007) *et al.* o processo divide-se em duas etapas fundamentais:

2.1.1.1 Moldagem ou compactação

A compactação é feita através da aplicação de pressão sobre o pó, sendo geralmente utilizados punções e matrizes que formarão a peça final. As medidas das matrizes geralmente são muito próximas às medidas finais da peça, pois o processo não tem muita dilatação durante esta etapa. (DELFORGE, 2007 *et al.*)

Esta etapa pode ser realizada de três formas: punção superior descendo na vertical e o punção inferior estático, punção superior estático e o punção inferior subindo na vertical ou ainda o punção superior descendo e o punção inferior

subindo. Na Figura 3 pode-se verificar o esquema de funcionamento desse processo. Porém, sabe-se que esse funcionamento pode influenciar na compactação final da peça e também em sua microestrutura, afetando diretamente na qualidade e resistência mecânica da peça (JESUS FILHO, 2006). Sendo assim, deve-se tomar muito cuidado na escolha na forma de compactação do processo, pois pode gerar um produto final com qualidade inferior a desejada.

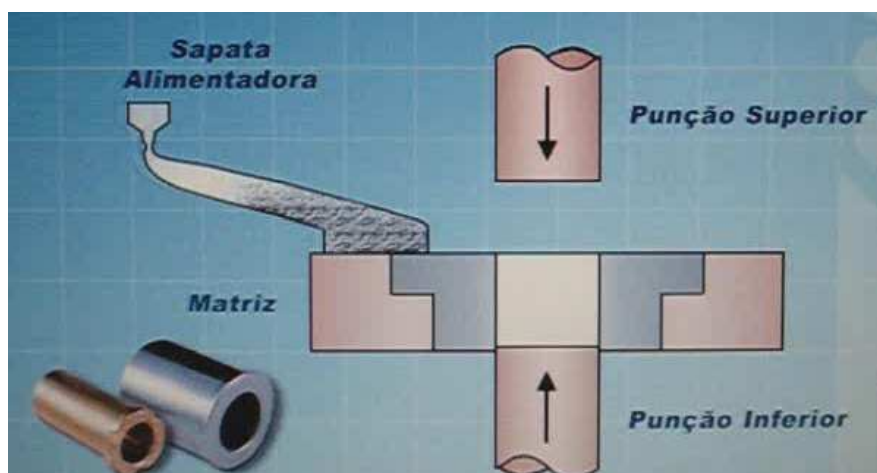


Figura 3 - Esquema de alimentação de pó na matriz.
Fonte: Metalurgia do pó, 2005

Durante a etapa de compactação, os principais controles são: massa, dimensional da peça e densidade do componente.

Após o processo de compactação (chamado de compactado verde) as peças são transferidas para próxima etapa.

2.1.1.2 Sinterização

Ainda conforme a pesquisa em Delforge (2007) *et al* a sinterização é realizada em fornos especiais, geralmente em temperaturas que variam entre 70% e 80% da temperatura de fusão das ligas envolvidas. Essa temperatura então deve ser muito bem controlada, além do tempo e do ambiente. Essa etapa define as propriedades mecânicas do material então compactado.

Porém, segundo Jesus Filho (2006), acrescenta-se ainda uma etapa anterior à compactação, que seria a mistura do pó. Essa mistura tem como objetivo homogeneizar a liga a fim de produzir uma matéria-prima de qualidade.

Ainda, conforme Jesus Filho (2006) pode-se ter agregadas etapas que fazem o serviço adicional de fabricação e/ou acabamento da liga que visam melhorar a precisão dimensional e também as propriedades mecânicas. Esses processos são:

recompressão, resinterização, forjamento, calibragem, infiltração metálica, tratamentos térmicos, usinagem e tamboreamento.

Comumente se utilizam de processos de austêmpera em algumas peças para melhorar suas propriedades mecânicas.

Tem-se a Figura 4 que mostra em forma de fluxograma as etapas de um processo de MP.

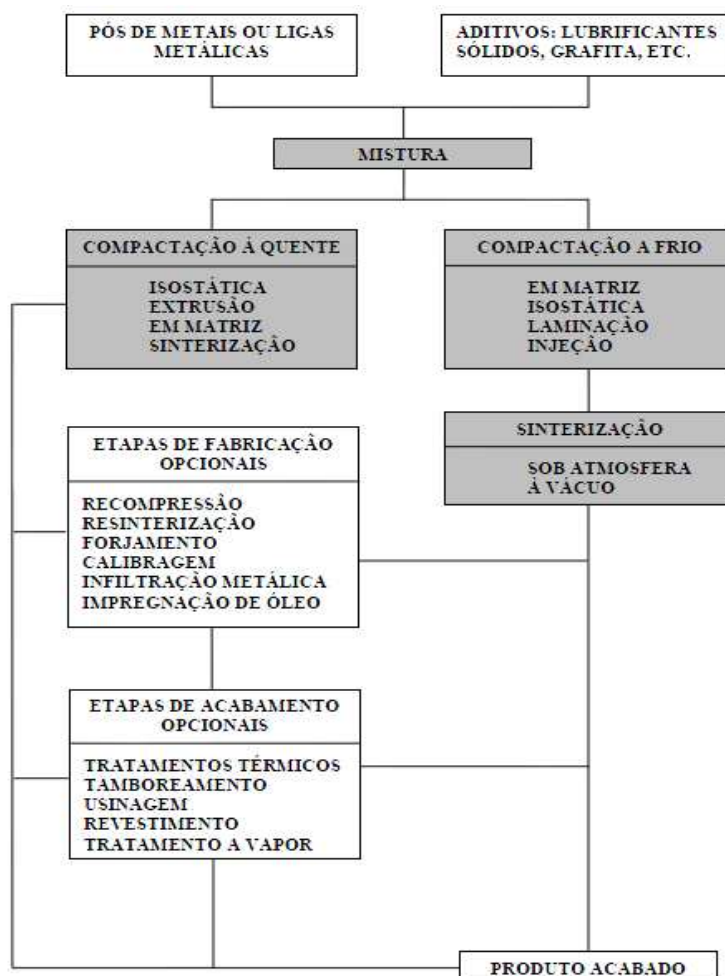


Figura 4 - Representação esquemática das etapas do processo de MP.

Fonte: Jesus Filho, 2006

Segundo Delforge (2007) *et al.* a teoria da sinterização comprova que, se aquecer o compactado a uma temperatura superior a metade da temperatura de fusão do material, ocorrerá uma união entre as partículas metálicas e estas tendem a alcançar as características físicas, (processo $1 > 2$) da Figura 5, químicas e mecânicas intrínsecas do material. Uma delas é a chamada densificação, conforme mostra a Figura 5 que ocorre via transporte de massa.

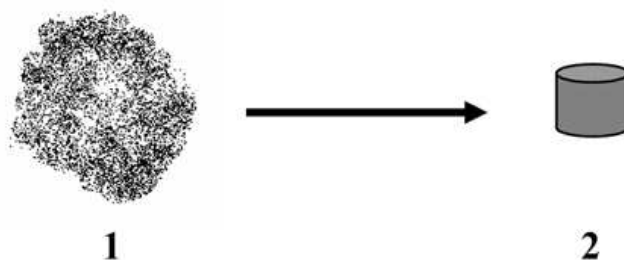


Figura 5 - Densificação
 Fonte: Delforge, 2007 *et al.*

2.1.2 Limitações e vantagens do processo

Segundo Chiaverini (2001) *et al.* o processo de MP tem diversas vantagens e desvantagens perante os outros processos, porém mais vantagens são destacadas, conforme segue.

Vantagens:

- Minimiza a usinagem posterior do componente;
- Minimiza a perda por refugos;
- Possibilita fazer peças com tolerâncias apertadas;
- Produz um bom acabamento superficial;
- Grande variedade de ligas;
- Permite a inclusão de carbonetos e/ou materiais muito duros ou frágeis em meio à liga;
- Permite controlar a porosidade para peças que trabalham com óleos e/ou lubrificantes;
- Capacidade de obtenção de peças com ligas diferentes na mesma peça, por exemplo, ligação de material cerâmico com metálico;
- Possibilita tratamento para ganho em propriedades mecânicas ou resistência ao desgaste;
- Faz-se peças com geometrias bastante complexas que seriam praticamente impossíveis de fazer em outros processos ou então seriam processos de custo relativamente alto. Exemplo: peças com metais refratários (Tungstênio, Molibdênio, Tântalo), metal duro (pastilhas para usinagem);
- Capacidade de ter-se um rigoroso controle de qualidade, pois trabalha com materiais-base puros.

Desvantagens:

- Altos custos iniciais de equipamentos e ferramental;
- Exige um lote de peças grandes devido ao alto custo inicial;
- Embora de grande diversidade, apresenta algumas limitações quanto à forma de peças, pois algumas são impossíveis de fazer a extração;
- Peças de grande volume necessitam de máquina muito grande para a fabricação;
- Peças grandes exigem grandes potências de compactação;
- Contaminação por outros pós durante o processo.

2.1.3 Principais aplicações

Sabe-se que em sua grande parte as peças produzidas pelo MP são feitas porque seu processo dificilmente pode ser obtido através de outro processo convencional de fabricação. Muitas vezes peças que são produzidas por usinagem tendem a serem fabricadas através do processo de MP porque seu custo inicial se tornaria barato devido a produção em grande escala. O que é mais relacionado ao processo de MP hoje em dia são as ferramentas de MD para usinagem. Esses materiais não são obtidos de outra forma se não por este método. Porém, esse não é o único ramo de aplicação do processo. Observa-se na Figura 6 a distribuição mundial de produção de componentes pela MP.

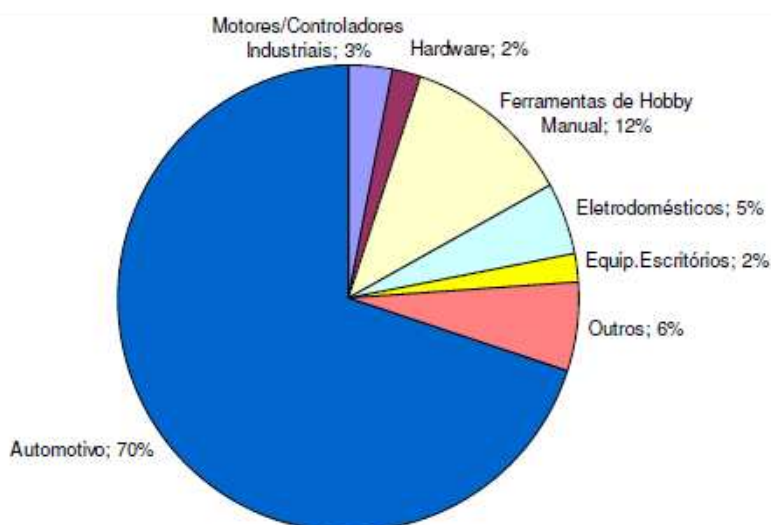


Figura 6 - Distribuição da produção de peças por MP no mercado mundial.
Fonte: Grupo setorial metalurgia do pó, 2009

2.1.4 Questões ambientais do processo

Sabe-se que o processo de MP ganha notoriedade quando falamos na questão ambiental, pois ele apresenta poucos refugos e também gera poucos resíduos industriais. O pó restante do processo pode ser armazenado e utilizado sem nenhum problema em outro material da mesma liga.

Segundo Delforge (2007) *et al.* estudos de grupos de pesquisa levam a procura cada vez mais do reaproveitamento de material. Estudos hoje são feitos para identificar uma liga que possa ser trabalhada com sucatas de material e reaproveitamento de peças oriundas de retrabalho do próprio processo.

2.2 PROCESSOS DE USINAGEM

Segundo Ferraresi (1977) o conceito de usinagem está no fato de, através de uma ferramenta de corte, gerar cavaco e obter uma peça metálica ou não, conferindo forma, dimensão e acabamento.

Conforme Machado e Silva (1999) os processos de usinagem estão classificados de duas formas: com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco, conforme mostra a Figura 7. Como o tema do trabalho é relacionado ao processo de usinagem iremos focar apenas nesse tópico.

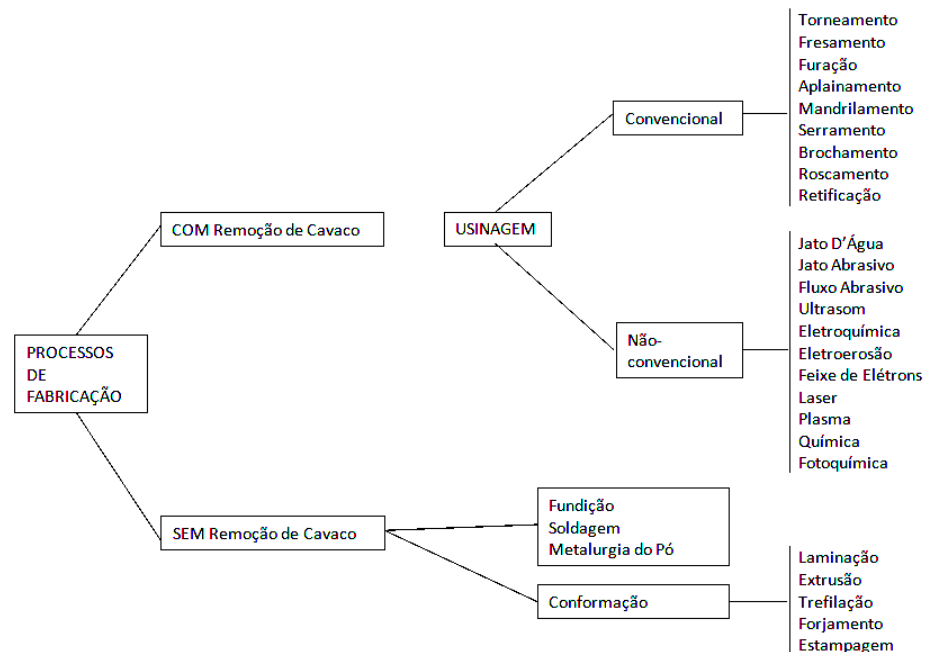


Figura 7 - Processos de fabricação.
Fonte: Adaptado de Machado e Silva, 1999

2.2.1 Processo de Torneamento

Conforme Ferraresi (1977) o processo de torneamento é um tipo de processo convencional de usinagem que utiliza ferramentas com geometria definida. Ele, ainda define o torneamento como sendo um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies por revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Segundo Trent (2000) dificilmente uma peça produzida sai de seu processo de manufatura sem ter passado por um processo de usinagem. Sabe-se também que o processo de torneamento é hoje o mais usado em processos de fabricação.

Os processos de torneamento estão demonstrados na Figura 8 e podem ser muito variados em suas aplicações, a partir dos quais evoluem para os mais complexos.

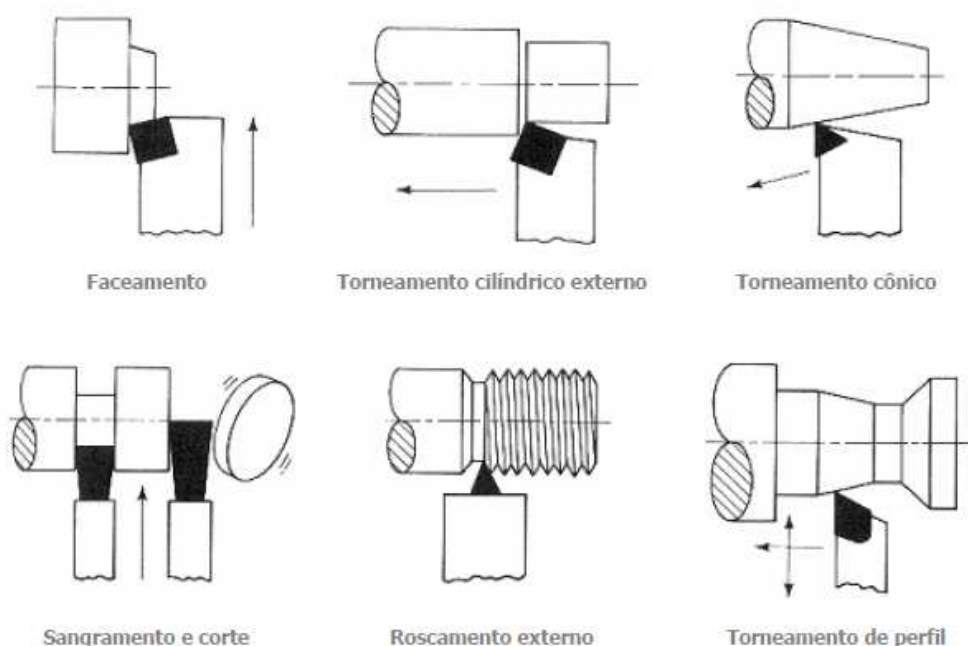


Figura 8 - Processos usuais de torneamento.
Fonte: Kalpakjian, 1995

Para Amorim (2002) os processos de torneamento diferem basicamente de algumas situações que dificilmente ocorrem nos demais processos.

- O corte da peça é normalmente contínuo;
- Comumente ocorrem movimentos da peça e da ferramenta simultâneos;

Segundo Ferraresi (1977) o processo de torneamento tem dois itens que influenciam diretamente na qualidade do processo e na qualidade dimensional da peça: geometria da aresta de corte e os parâmetros de corte empregados no processo:

- Velocidade de corte (v_c): segundo Stemmer (2005) é a velocidade instantânea do movimento principal, do ponto selecionado da aresta de corte em relação a peça; unidade (m/min);
- Movimento de avanço (f): é o movimento da ferramenta gerado manualmente ou pela máquina que tem como objetivo provocar um deslocamento entre a peça e a ferramenta. Quando somado ao movimento de rotação da peça leva a remoção de material e conseqüente geração contínua ou interrompida de cavacos, além de gerar uma superfície usinada de acordo com o desejado. Pode ser dado no sentido longitudinal e/ ou transversal da máquina; unidade (mm/rot);
- Profundidade de corte (a_p): é a espessura ou profundidade de penetração medida perpendicularmente ao plano de trabalho da peça, unidade (mm);

Com estes três parâmetros básicos conseguimos determinar a taxa de remoção momentânea (Q) de material, conforme equação (1).

$$Q = v_c \times a_p \times f \quad (\text{cm}^3/\text{min}) \quad (1)$$

Para entendermos melhor o processo precisamos definir algumas superfícies que são envolvidas durante a fabricação e estão localizadas na peça. Segundo Stemmer (2005) essas superfícies são divididas em três, conforme descritas a seguir e mostradas na Figura 9.

- Superfície a usinar: superfície que deverá ser removida durante a usinagem;
- Superfície transitória: é parte da superfície produzida na peça pelo gume da ferramenta e removida durante o curso seguinte de corte, durante a rotação seguinte da peça ou da ferramenta ou pelo gume seguinte.
- Superfície usinada: superfície desejada pelo processo, produzida pela ação da ferramenta sobre a peça;

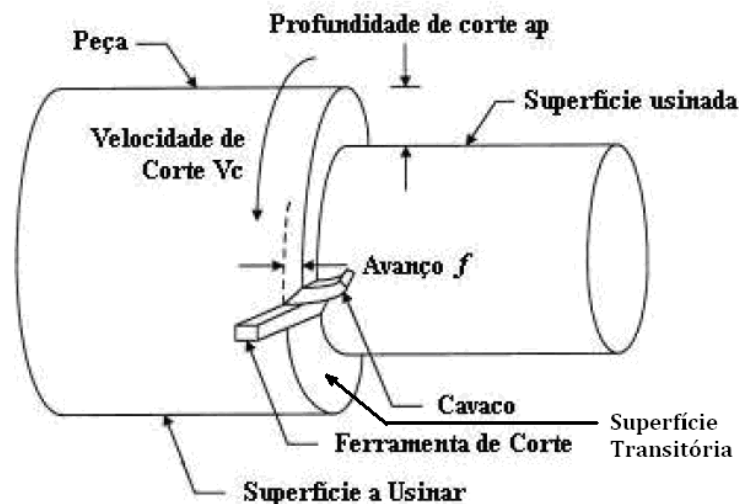


Figura 9 - Parâmetros de corte e superfícies na peça.
Fonte: Adaptado de Amorim, 2002

Segundo Stemmer (2005) a geometria da ferramenta influencia diretamente na qualidade do processo. Em função disso, é importante definir alguns ângulos e arestas da ferramenta, conforme Figura 10 .

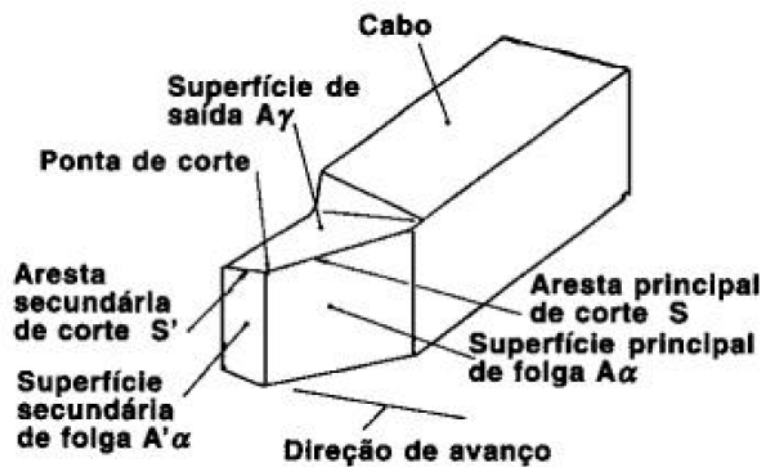


Figura 10 - Geometria da ferramenta de corte.
Fonte: Diniz, 2000 et al.

- Superfície de saída ($A\gamma$): superfície que tem por função fazer o cavaco escoar durante o processo;
- Aresta secundária de corte (S'): gera quando utilizado uma superfície secundária na peça;
- Superfície secundária de folga ($A'\alpha$): contém a aresta secundária e defronta com a superfície em usinagem secundária;
- Superfície principal de folga ($A\alpha$): é a superfície que defronta com a usinagem;

- Aresta principal de corte (S): formada pela interseção das superfícies de folga e saída. Faz a usinagem principal;
- Ponta de corte: é a ponta responsável pelo corte, formada pelo encontro da superfície principal, secundária e de folga, normalmente deve ter arredondamento;

Segundo Souza (2004) existem diversas variáveis no processo de torneamento e sabe-se que algumas delas são variáveis de entrada e outras de saída, conforme mostra a Figura 11. Caso muda-se apenas uma variável de entrada, conseqüentemente pelo menos uma ou mais variáveis de saída irá sofrer alteração.

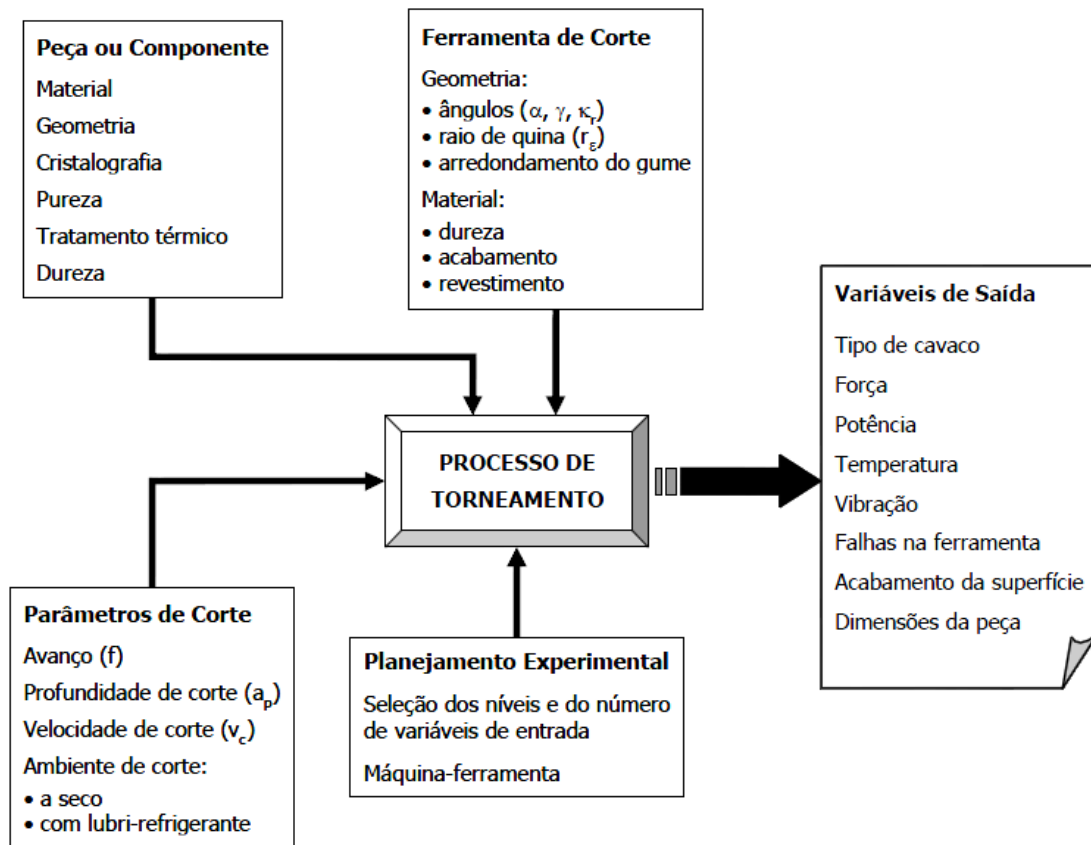


Figura 11 - Relações de entrada e saída no torneamento.
Fonte: Black, 1994

2.2.1.1 Material da peça

Conforme Souza (2004), as propriedades mecânicas, físicas e químicas do material da peça de trabalho são de extrema importância no processo de usinagem. Alguns materiais são aplicados em alguns processos apenas pela sua facilidade de usinagem, é o caso de aços com adição de enxofre, além de peças de ligas de

alumínio e ferro fundido. Alguns materiais, como aço inoxidável ou titânio são de difícil usinabilidade, podendo causar um desgaste rápido da ferramenta, de elevadas forças e/ou potências de corte e com isso, baixa qualidade de acabamento da superfície.

2.2.1.2 Geometria da peça

Sabe-se por Souza (2004) que a geometria da peça varia de acordo com a aplicação que lhe será dada. Com isso parâmetros de corte como profundidade de corte devem ser levados em conta. Comumente aplica-se no torneamento usinagens de peças por revolução que podem sofrer então processos de desbaste e acabamento. Para a escolha da matéria-prima deve-se levar em conta a geometria final da peça, pois muitas vezes podemos iniciar uma peça de uma barra sextavada ou até mesmo quadrada e não obrigatoriamente de uma barra cilíndrica. Quanto mais estudar a forma e dimensão de matéria-prima menos desperdício de material iremos ter.

2.2.1.3 Geometria da ferramenta

Uma ferramenta deve ser usada apenas para o processo a que foi estudada, pois qualquer mudança na geometria da peça ou material da peça podem fazer com que os seus ângulos tenham que ser modificados e estudados novamente. A formação de cavacos, a saída dos cavacos, as componentes da força de usinagem e o desgaste da ferramenta são consideravelmente influenciados pela geometria da ferramenta (DINIZ, 2000 *et al*). Da mesma forma, alterando o raio de quina (r_ϵ) não exercerá nenhuma influência significativa sobre as forças, enquanto for obedecida a exigência: $a_p \geq 2 * r_\epsilon$ (conforme Figura 12(a)). Souza (2004), também cita que quanto maior o ângulo de saída (γ_0 , conforme Figura 12(b)), menores serão a deformação e o trabalho de separação do cavaco da peça e, por consequência, menores serão: a temperatura, a pressão específica de corte (K_s) e o desgaste da ferramenta.

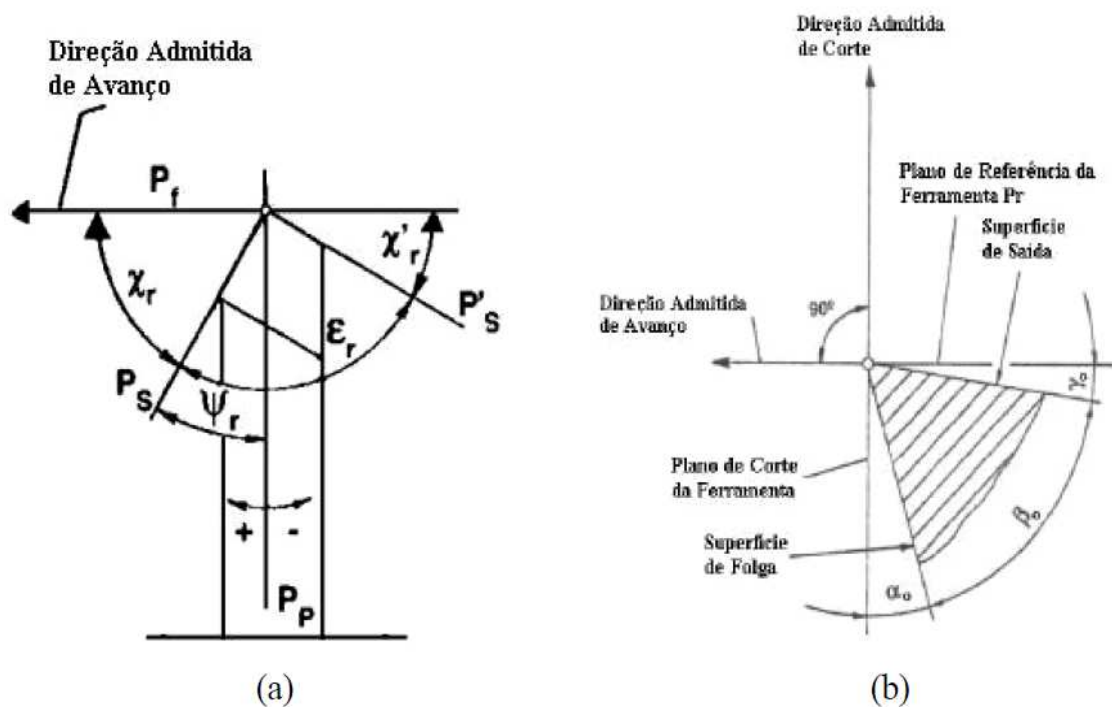


Figura 12 - Geometria da ferramenta.
Fonte: DINIZ, 2000 *et al.*

Sabe-se que com o aumento do ângulo de saída o gume da ferramenta torna-se mais frágil e passível de quebra. Quando usina-se materiais dúcteis o ângulo de saída tende a ser positivo, fazendo com que o cavaco escorregue sobre a superfície de saída da ferramenta. Já em materiais frágeis esse ângulo tende a ser o contrário, ou seja, negativo, fazendo com que haja a quebra do cavaco. Com a utilização do ângulo de saída negativo forças de corte maiores são registradas e um consequente aumento de potência necessária também, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Influência dos ângulos de saída e inclinação no torneamento.

Fatores de Influência				Mudança nas componentes da força de usinagem para cada grau de ângulo alterado			
				Força de avanço (F_f) [N]	Força passiva (F_p) [N]	Força de corte (F_c) [N]	
Diminuição ▼	Ângulo de saída (°)	(γ) ▲	5,00%	▲	4,00%	▲	1,50%
	Ângulo de inclinação (°)	(λ) ▲	1,50%	▲	10,00%	▲	1,50%
Aumento ▲	Ângulo de saída (°)	(γ) ▼	5,00%	▼	4,00%	▼	1,50%
	Ângulo de inclinação (°)	(λ) ▼	1,50%	▼	10,00%	▼	1,50%

Fonte: Adaptado de König, 1997

2.2.1.4 Parâmetros de corte

Toda operação de torneamento necessita de escolhas de parâmetros de corte para que a operação possa ser realizada. Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) devem ser estabelecidas para fazer a remoção do material. O tipo de tarefa a ser realizada estabelece quais parâmetros escolher. Conforme Souza (2004), essa escolha influenciará as variáveis dependentes. Nesta escolha também leva-se em conta a quantidade total de material a ser removido, qualidade dimensional da peça e acabamento da superfície. Sabe-se que operações de desbaste utilizam-se de velocidades de corte baixas, grande profundidade de corte e alta taxa de avanço. O contrário é verdadeiro para operações de acabamento (DINIZ, 2000 *et al*).

2.2.2 Ferramentas de Usinagem

Uma das etapas mais importantes do processo de usinagem é a escolha do material da ferramenta. Algumas exigências básicas são necessárias para que um material possa ser usado como ferramenta de corte no torneamento. Segundo Stemmer, 2005 as características são:

- Elevada dureza a frio bem superior à da peça a ser usinada;
- Elevada dureza a quente;
- Tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impactos;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Atualmente os tipos de materiais disponíveis para ferramentas são:

- Aços Ferramenta;
- Aços rápidos comuns;
- Aços rápidos com Cobalto;
- Ligas fundidas;
- Carbonetos sinterizados (Metal Duro - MD);
- cerâmica;

- Nitreto Cúbico de Boro (CBN).
- Diamante;

2.2.2.1 Metal Duro

Conforme Souza (2004) o MD detém em torno de 50% do mercado de ferramentas de usinagem. O Aço rápido (HSS) ainda é bastante usado e detém em torno de 40% do mercado, pois em alguns casos ele se torna de fácil aplicabilidade ao processo. O HSS é usado em indústrias de pequeno porte que não fazem o uso do MD em quantidades elevadas, pois se torna caro manter suportes e insertos com pouca utilização e também onde máquinas antigas não permitam velocidade de corte elevadas (máquinas com baixas rotações).

Sabe-se por Stemmer (2005) que o Carboneto de Tungstênio é a base do MD. As características deste metal fazem com que ele seja dotado de grandes propriedades mecânicas capazes de agüentar elevadas temperaturas na região da geração do cavaco. As características mais importantes são: elevado ponto de fusão (3387 °C); baixo coeficiente de dilatação térmica ($4,4 \times 10^{-6}$ mm/mm °C) e a mais alta resistência a tração (4200 MPa). Assim após estudos, verificou-se que elementos de liga adicionados ao Tungstênio dariam um bom rendimento para esse tipo de operações. Em 1927 a empresa alemã Krupp fez sucesso com a criação de sua marca comercial que é conhecida até hoje, a Widia. A composição mais usual do MD é composta de 81% de Tungstênio (W), 6% de Carbono (C) e o ligante Cobalto (Co) com 13% (STEMMER, 2005).

Em princípio essas ferramentas serviriam apenas para a usinagem de ferro fundido e materiais não ferrosos, pois apresentaram ótimos resultados durante os primeiros testes. Em usinagens de aço o MD não apresentou bom resultado, formando crateras na superfície de escoamento do cavaco, gerados por causa do grande atrito e elevada temperatura no cisalhamento do cavaco. Porém, estudos fizeram com que materiais fossem adicionados à liga, fazendo com que ganhasse além da resistência, também em outras propriedades (STEMMER, 2005).

Para colocar um padrão nas composições químicas criou-se uma norma para que os fabricantes obedecessem e a sigam em suas fabricações. A Tabela 2 mostra a variação da composição de acordo com a classe a ser utilizada na usinagem, segundo a norma ISO 513:2004.

Com o objetivo de melhorar ainda mais as propriedades das ferramentas são adicionadas camadas que tornam o MD revestido. Essa adição do revestimento gera um aumento na vida das ferramentas. Segundo Stemmer (2005) e Diniz (2000) *et al.* os revestimentos mais comuns são:

- TiC: com a aplicação deste revestimento o atrito é menor, fazendo com que reduções de temperatura sejam obtidas na aresta de corte da ferramenta. Então, ocorre menos desgaste, tanto por difusão, abrasão ou aderência. Há também uma redução das forças passivas e de avanço em função da redução por aderência, embora a força de corte resultante não diminua e permaneça igual à uma ferramenta sem cobertura;
- TiN: essa cobertura leva vantagem em relação à TiC pois gera menor difusão dos materiais ferramenta-peça. Com isso, há menos geração de cratera na superfície de saída do cavaco, porém, o desgaste de flanco tende a ser maior que o TiC.
- Al_2O_3 : é caracterizado pela alta dureza a quente, resistência a ataques químicos e a oxidação, mesmo em elevadas temperaturas, com resistência a formação de crateras, porém, toda essa qualidade gera pequena resistência a choques térmicos (não aconselhada para trabalhos com fluidos de corte) e fragilidade e certa aderência limitada sobre bases de metal duro.

Existem ainda, algumas classes de metal duro que são feitas com diversas camadas de cobertura.

- TiC – Al_2O_3 : sabe-se que o Al_2O_3 não tem uma boa aderência na base do metal duro, então, para isso usa-se uma camada intermediária de TiC. A principal aplicação deste revestimento é em usinagens aço fundido e de ferro fundido. Ensaio de vida demonstram que esse revestimento pode ter rendimento até 6 vezes mais em usinagens de ferro fundido e até 3 vezes em usinagens de aço fundido (DINIZ, 2000 *et al.*).
- Carbonitreto de Titânio TiC – Ti(C,N) – TiN: combinam as características de TiC dando boa resistência ao desgaste e as características do TiN de dar uma boa resistência a formação de crateras e resistência a oxidação. Sua principal aplicação é em aços, ferro fundido, ferro maleável e

materiais duros, com alta velocidade de corte. Não são adequados para a usinagem de ligas de Alumínio (Al), Magnésio (Mg), Titânio (Ti) e ligas de Níquel (Ni), pois estes podem ter afinidade com TiC ou o TiN.

Stemmer (2005) comenta que a tendência do mercado é a substituição de operações de retificação quando possível, pois existem no mercado ferramentas com revestimentos que podem ser utilizadas em suas usinagens. Essas ferramentas são:

2.2.2.2 Cerâmica

São aplicadas em base de Óxido de Alumínio puro ou em misturas de óxidos de alumínio com carbonetos metálicos. Possibilitam usinagens com alta velocidade de corte de aços e ferro fundido. É comum a sua utilização com velocidades de corte na ordem de 4 a 5 vezes superior velocidade empregadas na usinagem com metal duro. É empregada em usinagens de materiais duros com até 60 HRc.

Um dos principais motivos citados por Stemmer (2005) e Diniz (2000) *et al* para que a cerâmica não seja muito utilizada, é porque exige máquinas com alta rigidez, grandes potências e altas rotações, já que as velocidades de corte empregadas são altas. Vale lembrar que esse tipo de processo também gera cavacos muito quentes, fazendo com que a máquina necessite de um sistema de proteção eficiente.

A qualidade da ferramenta de cerâmica depende de sua baixa porosidade associada a pequenos tamanhos de grãos, sendo necessário um controle rigoroso da temperatura de sinterização. Pesquisas feitas na Escola Técnica Superior de Aachen revelam que a vida máxima de uma ferramenta de cerâmica é obtida quando os tamanhos de grão variam de 2 a 3 μm (STEMMER, 2005).

Vantagens da ferramenta de cerâmica:

- Alta dureza a quente;
- Elevada estabilidade química devido ao Óxido de Alumínio;
- Alta resistência a compressão;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Não forma aresta postiça, pois não tem afinidade com o aço.

Desvantagens da cerâmica:

- Grande fragilidade, exigindo máquina rígida;
- Não permite usinar com corte interrompido;
- Não permite grande balanço da ferramenta;
- Não se recomenda o uso de fluidos de corte, pois tem baixa condutividade térmica.

2.2.2.3 CERMET (cerâmica + Metal)

Segundo Diniz (2000) *et al* são compostos de uma ou mais fases de cerâmica e uma fase metálica, servindo de ligante. As partículas duras são de Nitretos de Titânio e carbonetos complexos de Titânio com proporções diferentes de Ta, W e Mo. O metal aglomerante é Ni ou Co. Quando na sinterização, a presença dos carbonetos de Titânio e outros óxidos inibem o crescimento dos grãos, conferindo assim elevada dureza, maior tenacidade e resistência a impactos.

Sua resistência ao desgaste é intermediária (entre o MD e a cerâmica), porém sua resistência na aresta de corte é comparável à do MD. São resistentes à oxidação e formação de aresta postiça.

Suas principais aplicações são para usinagens de aços para moldes e matrizes com dureza de até 50 HRc.

As principais aplicações do CERMET são em usinagens com alta dureza, pois ele pode usinar metais com 45 a 65 HRc, ligas resistentes ao calor a base de Níquel e Cobalto, HSS, peças com revestimentos duros, com altos percentuais de WC ou Cr-Ni. Devido a sua boa resistência ao impacto é empregada também em usinagens interrompidas e na remoção de cascas de peças oriundas de fundição e forjamento, além de fazer a usinagem de ferro fundido coquilhado.

As velocidades de corte empregadas são de 50 a 200 m/min, avanços de 0,10 a 0,30 mm/rot e profundidade de corte $\leq 2,50$ mm.

Embora seja muito utilizada para acabamentos essa classe de ferramentas é também empregada em desbaste. Em acabamentos as rugosidades possíveis podem ser inferiores a 1 μm , dispensando o processo de retificação posterior.

2.2.2.4 Diamante

Sabe-se que é o material mais duro conhecido. Existem três divisões básicas do diamante, sendo elas; Carbonos, Ballos e Borts.

- Carbonos: são também conhecidos como diamantes negros e são aparentemente amorfos, que por aquecimento perdem dureza e por isso são empregados em aplicações especiais, como ferramentas para retificar rebolos e pontas de brocas para minas.
- Ballos: são diamantes claros, irregulares em seu crescimento e duros devido a sua estrutura. Sua forma circular o torna sem aplicação na fabricação de ferramentas de corte.
- Bort: são diamantes monocristalinos. Apresentam a anisotropia como uma qualidade boa, fazendo com que sua resistência mecânica (dureza, resistência e módulo de elasticidade), que variam com a direção. Para isso, no momento da montagem da ferramenta tem que se conhecer a estrutura cristalina. A lapidação deve ocorrer sempre na direção da mínima dureza, sua montagem então no porta ferramenta deve ser feita de modo a orientar a força de usinagem na direção da máxima dureza.

Esses diamantes monocristalinos são empregados em usinagens de metais leves como bronze, cobre, liga de estanho, borracha dura e mole, vidro, plástico e pedra. Suas aplicações são então para usinagens onde o grau de precisão exigido seja alto e um bom acabamento da superfície. Consegue-se obter superfícies praticamente polidas com esse tipo de ferramenta.

Segundo Stemmer (2005), as velocidades de corte praticamente não apresentam limites superiores, porém recomenda-se o mínimo de 100 m/min. Os avanços empregados devem ser da ordem de 0,02 mm/rot a 0,06 mm/rot e as profundidades de corte não devem ultrapassar 1,00 mm e nem menos de 0,01 mm, porém, recomenda-se um máximo de 0,20 mm de profundidade de corte.

2.2.2.5 Diamante Policristalino

Segundo Stemmer (2005) este tipo de diamante, sintético, foi apresentado pela primeira vez como ferramenta de usinagem por volta de 1973. São partículas muito finas de diamantes sintético, com granulação muito definida que o tornam

homogêneo. O diamante sintético é obtido através da sinterização das partículas do diamante com cobalto num processo de elevada pressão (6000 a 7000 MPa) e elevada temperatura (1400 a 2000 °C). A camada fina de 0,50 mm de espessura é aplicada sobre uma base de MD pré sinterizada ou ligada através de uma fina camada intermediária de um metal de baixo módulo de elasticidade.

Esses insertos podem ser soldados em cabos ou fixados mecanicamente em porta-ferramenta padrões, pois tem formas e dimensões que seguem a mesma norma de fabricação das geometrias das pastilhas comerciais de MD.

Sua aplicação é bem ampla e repetida do monocristalino, acrescido ainda da possibilidade de usar MD pré sinterizado. Há muita aplicação na usinagem de Alumínio, pois obtém-se um bom acabamento da superfície e não há tendência de adesão do Alumínio no diamante. Reduzem-se as forças de corte e a vida da ferramenta aumenta consideravelmente, pois não há adesão do material do corte na ferramenta.

2.2.2.6 CBN (Nitreto Cúbico de Boro)

Conforme Diniz (2000) *et al.* e Stemmer (2005), depois do diamante, o CBN é o material mais duro que se conhece. É um material sintético obtido através da reação de halogenetos de Boro com amoníaco. Assim como no Carbono existe uma forma macia, que é a hexagonal, de estrutura cristalina semelhante a do grafite. Há também uma forma dura, cúbica, de uma estrutura semelhante a do diamante.

Uma das virtudes do CBN em relação ao diamante é que o CBN é quimicamente mais estável, especialmente contra a oxidação. A fabricação das pastilhas de CBN é análoga a de diamante, aplicando-se uma camada de 0,50 mm sobre a base de MD pré-sinterizado. Uma das diferenças básicas é quanto à fixação, pois há insertos que são fixados diretamente no porta-ferramentas e também há aqueles que são brasados na haste e posteriormente retificado com rebolo de diamante.

2.2.3 Desgaste e avarias na aresta de ferramenta de corte

Os desgastes da aresta da ferramenta podem ocorrer por diversos fatores. Segundo Diniz (2000) *et al.* e Stemmer (2005) esses desgastes são gerados por diferentes fatores durante a usinagem.

Segundo Stemmer (2005), nenhuma ferramenta é capaz de suportar infinitamente variações de esforço mecânico, bem como variações de temperatura, como ocorre num processo de usinagem, fazendo com que o processo de usinagem gere desgastes e/ou avarias durante o corte, conforme descritos a seguir:

- Desgaste frontal ou flanco: ocorre sempre na superfície de folga da ferramenta, ocasionado pelo contato entre a peça de trabalho e a ferramenta. Esse tipo de desgaste sempre aparece durante a usinagem, mesmo na fabricação de uma peça apenas. A Figura 13 mostra o desgaste de flanco ocasionado na aresta de corte da ferramenta. Sempre que há um desgaste de flanco, este apresentará entalhes na aresta de corte, como pode-se observar nos destaques b e c da Figura 13.



Figura 13 - Desgaste frontal ou de flanco.
Fonte: Diniz, 2000 et al.

- Desgaste de cratera: ocorre sempre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta. Superfícies revestidas de Al_2O_3 tendem a gerar menos esse tipo de desgaste, pois é mais eficiente contra a craterização (menos afinidade). Operações que gerem cavacos curtos também não geram muito esse tipo de desgaste, como exemplo, usinagem de Ferros Fundidos. Esse desgaste tem que ser muito bem observado, pois pode levar à ferramenta a quebra quando a cratera encontra o desgaste de flanco. Tem-se demonstrado na Figura 14 um clássico desgaste de cratera.

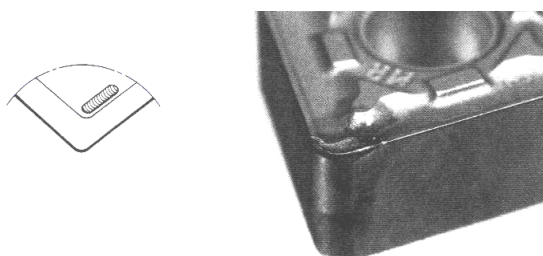


Figura 14 - Desgaste de cratera.
Fonte: Diniz, 2000 et al.

- Deformação plástica da aresta: esse tipo de avaria acontece devido as altas temperaturas envolvidas no momento do corte e também as altas pressões exercidas sobre a ferramenta. Pode-se observar na Figura 15 (a e b) que a ponta da ferramenta se deforma, desfigurando-a totalmente. A principal consequência dessa deformação é no acabamento da superfície da peça. Pode-se evitar este tipo de avaria usando uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência a deformação plástica

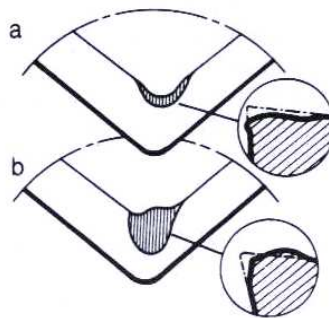


Figura 15 - Deformação plástica.
Fonte: Diniz, 2000 *et al.*

- Lascamento: neste tipo de falha são retiradas partículas maiores da aresta de corte. Ocorre principalmente pela má escolha da ferramenta, sendo por fragilidade da aresta de corte ou mesmo pela fragilidade do material da ferramenta. Prejudicam o acabamento da superfície e se não observado a tempo de vida do inserto, este pode vir a quebrar (Figura 16).

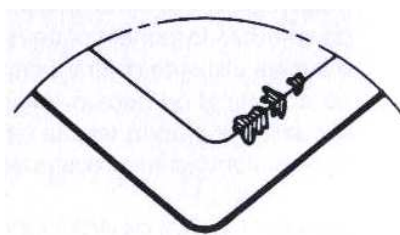


Figura 16 - Lascamento do inserto.
Fonte: Diniz, 2000 *et al.*

- Trincas: esse tipo de avaria ocorre principalmente pela variação de temperaturas durante o processo e também pela variação dos esforços durante o corte. Sabe-se por DINIZ (2000) *et al.* que quando a trinca acontece perpendicular à aresta de corte sua origem é térmica, quando acontecem paralelo à aresta tem origem de ordem mecânica, conforme mostrado na Figura 17 (a e b). Esse tipo de avaria acontece principalmente em cortes interrompidos, direção do fluido de corte fora da

região de corte, variação de espessura de corte e soldas da pastilha no suporte.

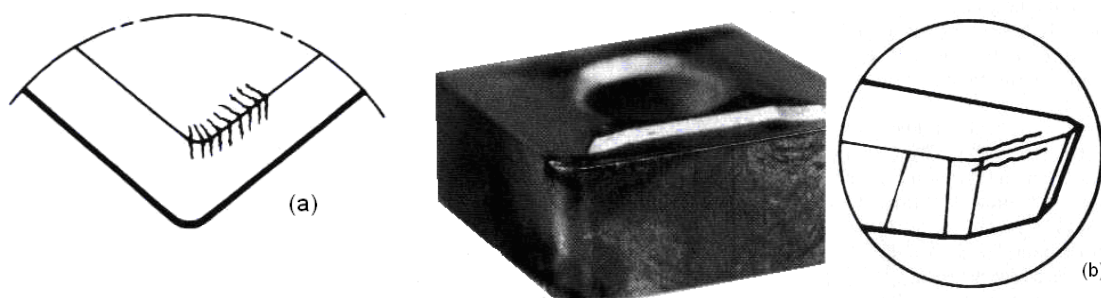


Figura 17 - Trincas de origem térmica (a) e trinca de origem mecânica (b).
Fonte: Diniz, 2000 et al.

- Quebra: verifica-se quanto aos itens relacionados a desgastes e avarias, que todas elas podem gerar uma quebra na ferramenta, porém, essa não é a única causa. Muitas vezes a má escolha da ferramenta pode gerar essa quebra. Exemplo: pode-se escolher uma ferramenta muito resistente ao desgaste para fazer o uso em cortes interrompidos, porém sabe-se que neste caso seria melhor uma ferramenta mais tenaz. Deve-se cuidar também com parâmetros de corte em ferramentas que não apresentam um ângulo de ponta muito grande, pois não apresentam grande robustez. Deve-se tomar cuidado quando há a quebra, pois ela pode danificar a peça, o calço e também o suporte da ferramenta.

Em resumo, tem-se o Quadro 1 que demonstra quais as ações a serem seguidas quando ocorrer alguma avaria ou desgaste na aresta de corte da ferramenta (DINIZ, 2000 et al.)

Tipo de desgaste ou falha	Possíveis causas	Ações para correção
Desgaste de Flanco	- v_c alta - v_c baixa (quando aparece APC) - Resistência ao desgaste insuficiente - Abrasão - Aresta postiça de corte (APC)	- Redução de v_c - Seleção de ferramenta mais resistente ao desgaste; - Se APC, aumentar v_c
Desgaste de Entalhe	- Oxidação	- Seleção de fluido de corte - Redução de v_c
Desgaste de Cratera	- Difusão	- Seleção de ferramenta que possua revestimento de Al_2O_3
Deformação Plástica	- Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte	- Seleção de ferramenta que possua maior dureza a quente

Trincas de origem mecânica	- Variação excessiva de esforço de origem mecânica	- Seleção de uma classe mais tenaz - Redução do avanço - Suavizar o primeiro passe
Trincas de origem térmica	- Variação excessiva de temperatura	- Seleção de uma classe mais tenaz - Aplicação de fluido em abundância ou não aplicação
Lascamento	- Classe da ferramenta muito frágil - Geometria da ferramenta muito fraca - Choques da ferramenta com a peça	- Seleção de uma classe mais tenaz - Aumento do ângulo de ponta, aumento do raio de ponta - Suavizar o primeiro contato da peça com a ferramenta

Quadro 1 - Causas e ações para evitar desgastes e avarias na ferramenta.

Fonte: Diniz 2000 *et al.*

2.2.3.1 Medição dos desgastes da ferramenta

Para avaliar o tempo de vida da ferramenta, são medidos o desgaste de flanco e o de cratera. O desgaste de flanco é medido na superfície de folga da ferramenta e o desgaste de cratera medido na superfície de saída.

Conforme a norma ISO 3685:1993 para o desgaste de flanco pode-se medir a largura do desgaste de flanco (VB_B) e a largura máxima do desgaste de flanco (VB_{Bmax}). Para o desgaste de cratera, a profundidade da cratera (KT), largura da cratera (KB) e a distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). A Figura 18, mostra os locais para medição do desgaste.

Segundo a norma ISO 3685:1993 o critério de controle de vida de uma ferramenta de corte para torneamento é quando o desgaste de flanco atinge um limite de $VB_B = 0,30 \text{ mm}$ ou $VB_{Bmax} = 0,60 \text{ mm}$.

Segundo Diniz (2000) *et al.* o desgaste de flanco é gerado pelo contato da superfície da ferramenta com um componente rígido, neste caso, a peça. O desgaste é então incentivado pela presença de partículas duras no material da peça e também pela temperatura gerada no ponto de corte, que provoca uma redução na aresta de corte da ferramenta.

A aresta postiça de corte (APC) pode ser uma causadora do desgaste de flanco, pois com o arrancamento dessa APC partículas da superfície de folga da ferramenta podem ser arrancadas junto, causando um desgaste de flanco naquele ponto. (DINIZ, 2000 *et al.*)

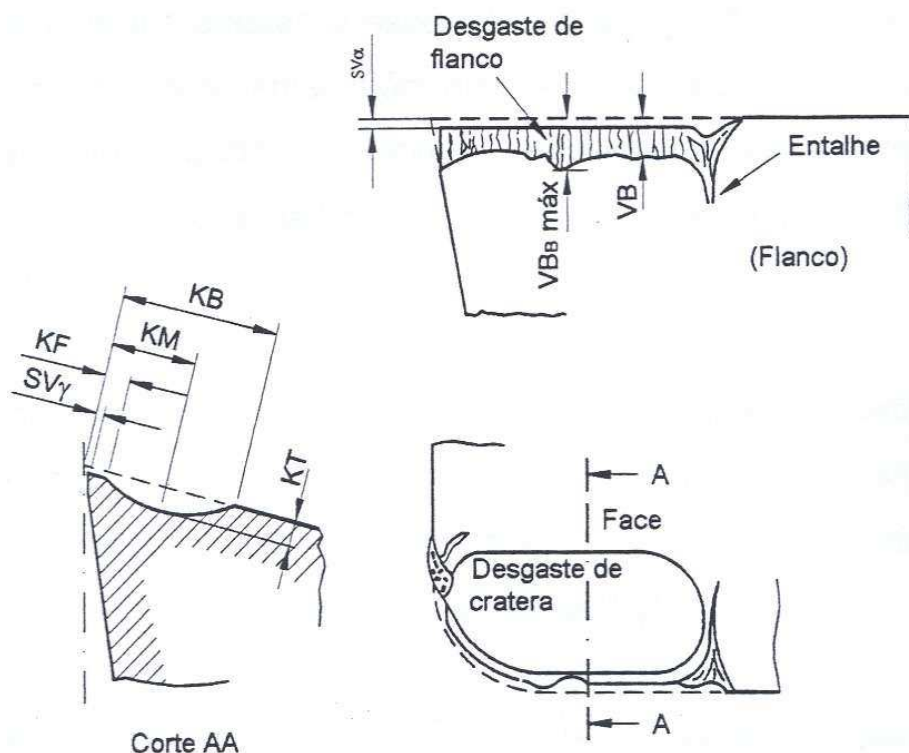


Figura 18 - Desgaste de ferramenta.
Fonte: Norma ISO 3685:1993

Para evitar o desgaste de flanco procura-se utilizar ferramentas com teor de TiC + TaC altos, ou seja, classe ISO mais baixa possível (exemplo P01, K10, M10), cuja característica é ter elevada dureza a quente.

2.2.3.2 Critério de vida da ferramenta de corte

À medida que o processo de usinagem avança, as temperaturas durante o processo aumentam, bem como os esforços mecânicos. Com isso, a tendência é que os desgastes da ferramenta aumentem e atinjam o limite, fazendo com que forças e potências de corte sejam mais elevadas, alterando a superfície usinada e piorando o acabamento da superfície. Stemmer (2005) diz que em condições extremas de corte o fim de vida da ferramenta começa a dar sinais quando há um faiscamento intenso no corte e a superfície da peça tende a ficar áspera.

Estudos em laboratório são feitos para determinar a vida das ferramentas, porém há vários critérios que podem ser adotados, conforme descritos a seguir:

- Quebra da ferramenta: geralmente não deve-se deixar chegar até este ponto, pois pode danificar a peça de trabalho, suporte da ferramenta e também pode apresentar riscos aos operadores;

- Falha preliminar da ferramenta: para identificar esse tipo de falha deve-se observar a superfície transitória da peça. Caso apareça uma superfície estreita aparentemente polida indica que há forte atrito de escorregamento com o flanco da ferramenta;
- Largura da marca de desgaste, no flanco: é o critério mais adotado na indústria, geralmente, quando atinge-se uma marca de desgaste de 0,80 a 2,00 mm as ferramentas de MD perde eficiência no corte (STEMMER, 2005). É possível e comum ter essa marca em insertos de maiores tamanhos, porém, para isso deve-se usar v_c mais baixas e classes de elevada tenacidade;
- Vibrações intensas: geralmente são causadas pelo desgaste de flanco e impedem o prosseguimento da usinagem;
- Profundidade KT: se KT aumentar irá diminuir a medida KF, conforme Figura 18, podendo gerar lascamento da aresta, ameaçando a integridade da aresta de corte;
- Acabamento superficial ruim: ocorre subitamente mudança no acabamento da superfície da peça;
- Formação de rebarbas de usinagem na peça;
- Forma dos cavacos: variação brusca na forma do cavaco, sem que haja mudança nos parâmetros de corte;
- Alteração dimensional da peça: em virtude do desgaste da ferramenta o dimensional da peça é alterado devido ao afastamento da aresta de corte em relação a peça. Geralmente em máquinas com CN esse desgaste é compensado após verificação da medida da peça. Se a medida da peça estiver fora da especificação de projeto, é feita a correção da ferramenta (DINIZ, 2000 *et al*);
- força de corte, Torque ou Potência: são executados ensaios em laboratórios, com o auxílio de dinamômetros que registram as forças durante o processo. Geralmente adota-se uma variação limite na força, Potência ou Torque;
- Aumento da temperatura do gume: esse tipo de ensaio tem sido realizado em laboratórios com o auxílio de termopares ou outras medidas de controle fixadas no inserto próximo a zona do corte (STEMMER, 2005).

Na indústria aplicam-se outros métodos de controle de vida da ferramenta, citados a seguir:

- Medição do tempo efetivo de corte, conforme Sandvik (2009) o tempo ideal de uma ferramenta com os parâmetros tabelados e recomendados é de 15 minutos;
- Volume de material removido;
- Velocidade de corte de equivalente: é possível calcular uma velocidade equivalente sabendo-se uma vida média de base da ferramenta. Com isso calcula-se a v_c que deve ser empregada no processo para o tempo de vida determinado.

2.2.4 Forças de corte

Sempre é importante saber as grandezas que estamos trabalhando durante a usinagem. Estudos realizados por pesquisadores desenvolveram dinamômetros que foram criados para registrar as forças e tornar seus resultados possíveis de serem estudados.

A força de corte durante a usinagem é considerada uma ação da peça sobre a ferramenta. Num processo de torneamento existem três forças principais, são elas: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p), conforme mostra a Figura 19. Essas forças irão gerar uma força resultante que é chamada de força de Usinagem (F_u). Sua decomposição deve obedecer a norma DIN 6584/1980 e as unidades de medida estão expressas em N.

A F_c é a projeção de F_u sobre a direção do corte, F_f é a projeção de F_u sobre a direção de avanço e por fim F_p que é a projeção de F_u perpendicular à direção do avanço.

Para o cálculo de F_u existe ainda a força ativa F_t , que não pode ser medida, mas sim calculada através da equação (2).

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \text{ (N)} \quad (2)$$

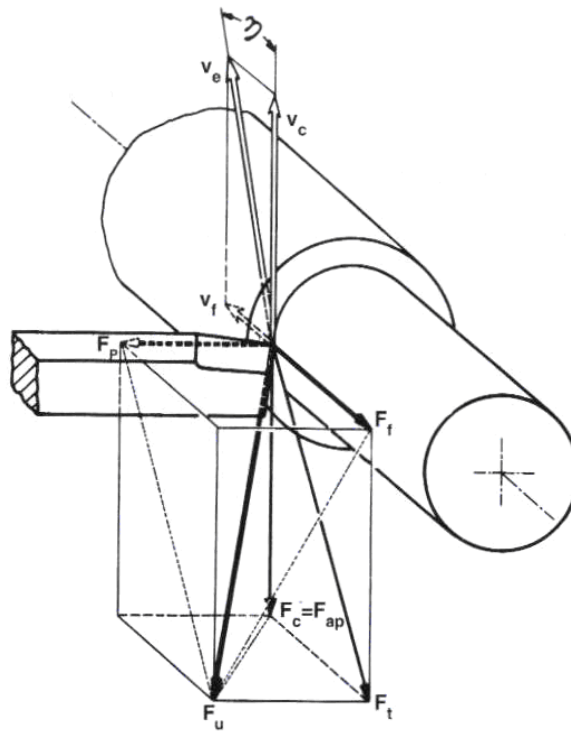


Figura 19 - força de Usinagem e suas componentes.
Fonte: Diniz, 2000 et al.

Com o cálculo da força ativa pode-se então calcular a F_u resultante do processo, conforme equação (3).

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \text{ (N)} \quad (3)$$

Sabe-se por Diniz (2000) *et al* que a força de corte é função da pressão específica de corte (K_s) e da Área da seção de corte, que por sua vez, num processo de torneamento, é função de a_p e f , conforme equação 4.

$$F_c = K_s \times A = K_s \times (a_p \times f) \text{ (N)} \quad (4)$$

A pressão específica é influenciada por diversos fatores, conforme segue:

- Material da peça: varia de acordo com a composição química da peça. Quando aumenta-se o percentual de Carbono, K_s aumenta. Adição de Fósforo (P), Enxofre (S), Chumbo (Pb) e Boro (B) causam a diminuição de K_s (ALLAM, 1991) e (DINIZ, 2000 et al).
- Material e geometria da ferramenta: modificando apenas o material da ferramenta não tem-se alterações consideráveis nos valores de K_s . Porém,

ao aumentarmos o ângulo de saída da ferramenta (γ_0) e o de inclinação (λ) os valores de K_s diminuem, pois há uma menor deformação do material na saída do cavaco

- Seção de corte: K_s diminui com a área da seção de corte. Sabe-se por Diniz (2000) et al. que o valor do avanço tem maior influência no aumento de K_s , conforme Figura 20 e Figura 21 ao compararmos o aumento de a_p e aumento de f em gráficos separados. Nota-se que com o aumento do avanço (Figura 20) os valores de K_s diminuem, devido ao fato de todo o volume de material se transformar em cavaco e não deixando o material deslizar entre a peça e a superfície de folga da ferramenta.

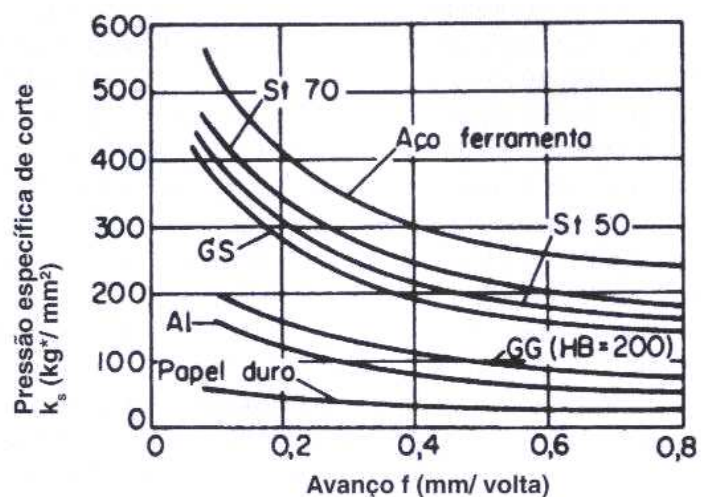


Figura 20 - Variação de K_s com o avanço.
Fonte: DINIZ, 2000 et al.

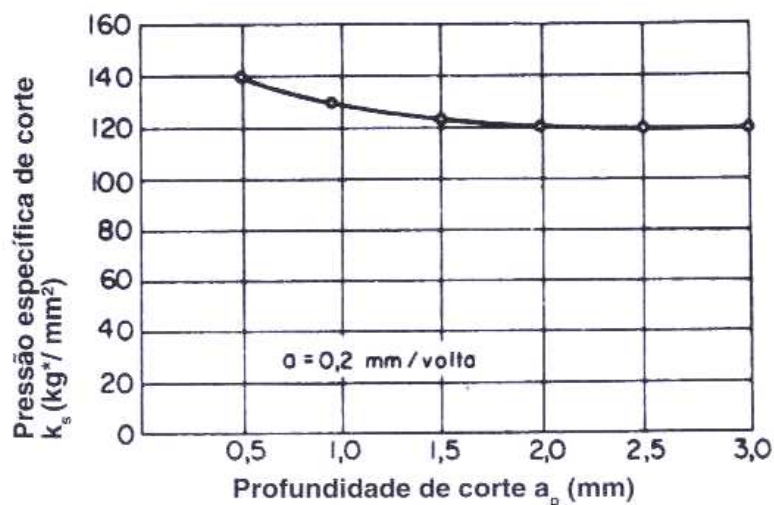


Figura 21 - Variação de K_s com a profundidade de corte.
Fonte: Diniz, 2000 et al.

- Velocidade de corte (v_c): quando utiliza-se v_c baixa, há a tendência da geração de aresta postiça de corte (APC), fazendo com que o ângulo de saída efetivo da ferramenta aumente, causando uma diminuição do K_s . Utilizando-se de parâmetros normais de v_c , há a tendência do valor de K_s diminuir, pois aumenta-se a temperatura efetiva e consequentemente a dureza do cavaco, além de aumentar o coeficiente de atrito.
- Utilização de fluidos de corte: provocam a diminuição de K_s , em função da diminuição do atrito do cavaco com a ferramenta.
- Desgaste da ferramenta: com o aumento do desgaste de flanco, o valor de K_s aumenta, fazendo com que haja aumento do atrito entre peça-ferramenta.

2.2.5 Potências de usinagem

Diniz (2000) *et al.* descreve que para girar o eixo-árvore e executar uma operação de usinagem uma máquina precisa de potência suficiente para executar tal operação e fazer o movimento de avanço. Assim, para dimensionarmos a Potência de corte e de avanço necessária para efetuar as operações na máquina, podemos utilizar a equação 5 e equação 6.

$$P_c = \frac{F_c \times v_c}{60.10^3} \quad (\text{kW}) \quad (5)$$

$$P_f = \frac{F_f \times v_f}{60.10^6} \quad (\text{kW}) \quad (6)$$

Como F_c e F_f são dadas em N, v_c em m/min e v_f em mm/min, as Potências de corte e de avanço são calculadas em kW.

Para dimensionarmos a máquina a ser usada para o processo de usinagem devemos levar em conta o rendimento que o sistema proporciona. Máquinas antigas e convencionais, com sistemas de transmissão com engrenagens possuem um rendimento de em torno de 60 a 80%. Máquinas com comando numérico computadorizado (CNC), tem seu rendimento superior a 90% (DINIZ, 2000 *et al.*)

2.2.6 Usinagem de Aço Rápido Sinterizado em torneamento

Nas literaturas disponíveis, pouco fala-se sobre usinagem de ARS, pois em sua maioria das peças são componentes automotivos e estas indústrias exigem um rigoroso controle de informações.

Segundo Jesus Filho (2006) o processo de torneamento de ARS é considerado um corte interrompido, pois os poros separam as partículas do material. Esse fator faz com que a vida da ferramenta seja diminuída, justamente por provocar choques na ferramenta, conforme observa-se na Figura 22.

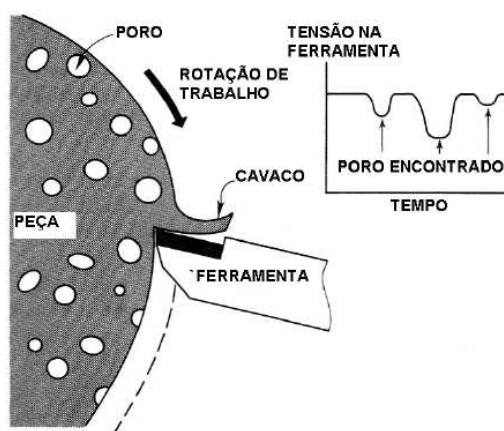


Figura 22 - Torneamento de peça fabricada pela MP.
Fonte: German, 1984

Com a função de melhorar os processos de usinagem, alguns elementos de menor ponto de fusão são adicionados à liga como: Cobre, Chumbo, Enxofre, MoSi_2 , Telúrio e Boro (ALLAM, 1991).

Com isso, o foco deste estudo é verificar se a variação do percentual de Nitreto de Boro Hexagonal, adicionada à liga comercial, influencia na usinabilidade.

2.2.7 Usinabilidade

Vários autores definem usinabilidade de formas distintas, mas todos chegam a um acordo, não há nenhum valor prático que quantifique a usinabilidade de um material sem que haja uma comparação.

Segundo Diniz (2000) *et al* o conceito de usinabilidade é uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Segundo Stemmer (2005) é uma propriedade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte denomina-se usinabilidade.

Jesus Filho (2006) explica que a usinabilidade tem grande influência nos custos da produção. Se analisarmos uma usinagem e esta apresentar um índice baixo, pode significar que a v_c empregada é alta. Ao diminuirmos essa v_c iremos diminuir o índice de desgaste na ferramenta, em contrapartida aumenta-se o tempo efetivo de corte e conseqüentemente o tempo/custo de usinagem também. Para corrigir esse fato ter-se-ia que propor uma mudança de classe de pastilha, visto que com essa alteração, consegue-se aumentar a resistência ao desgaste.

Diniz (2000) *et al.*, Stemmer (2005) e Jesus Filho (2006) dizem que o índice de usinabilidade não é propriedade do material e sim que esta depende da relação que há entre o material da peça e da ferramenta.

O índice de usinabilidade pode ser avaliado de quatro formas, sendo elas em conjunto ou não. Através de pelo menos um destes métodos pode-se definir o índice. Segue os métodos indicados por DINIZ (2000) *et al.*

- Vida de ferramenta;
- força de usinagem;
- Qualidade da superfície da peça;
- Formação dos cavacos.

Pode-se pensar que um material duro tem um índice de usinabilidade baixo e que, portanto, um material mole é de boa usinabilidade e tem índice mais elevado. Segundo Diniz (2000) *et al.* a quantidade de inclusões, de aditivos, a microestrutura, a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de saída da ferramenta e a quantidade de partículas duras são características importantes para determinar o índice, além da dureza e da resistência mecânica do material.

2.2.8 Rugosidade da superfície

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. Por esse motivo, a importância do estudo da qualidade da superfície aumenta à medida que crescem as exigências de projeto, sendo que os processos de fabricação dos componentes mecânicos determinam os acabamentos diversos nas suas superfícies.

As superfícies para componentes deslizantes, como o eixo de um mancal, devem ser menos rugosas para que o atrito seja o menor possível. Já as exigências

de acabamento das superfícies externas da tampa e da base do mancal são menores. Em virtude disto, a produção das superfícies menos rugosas possuem, em geral, custos de fabricação mais elevados.

O processo de medição da rugosidade é executado com auxílio do rugosímetro. O princípio de medição baseia-se num sensor de contato mecânico em forma de agulha apalpadora anexada à unidade de detecção que percorre a superfície usinada da peça. O deslocamento no sentido vertical sofrido pela agulha é registrado pelo equipamento e mostrado no *display* do equipamento através do método de rugosidade escolhido.

A qualidade da superfície de peças que sofrem processos de fabricação mecânica normalmente são consequências de parâmetros de entrada. A rugosidade no torneamento é decorrente principalmente do raio de ponta da ferramenta e do avanço (JESUS FILHO, 2006).

Além dos parâmetros de corte, os ângulos das ferramentas também influenciam na qualidade da superfície. No torneamento ao aumentarmos os ângulos de posição e ângulo de saída há a tendência do valor da rugosidade aumentar. Uma observação relevante não deve ser esquecida é que ao aumentarmos o ângulo de posição a força passiva atuante aumenta o que gera maiores vibrações no processo, tendendo a piorar a qualidade da superfície (SOUZA, 2004).

Dentre os métodos para medição de rugosidade temos: R_a , R_y , R_z e R_{3z} . O parâmetro mais utilizado para controle da qualidade da superfície é o R_a (DINIZ, 2000) *et al.* O método de medição em R_a consiste em avaliar a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_1) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m), conforme Figura 23.

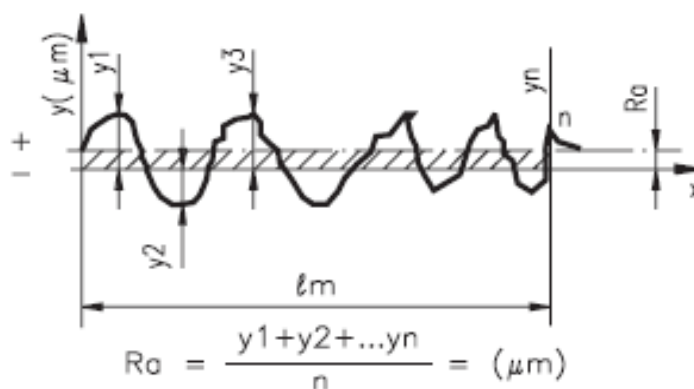


Figura 23 - Parâmetros de rugosidade R_a
Fonte: Telecurso, 2000

O principal parâmetro a ser definido na medição do Ra é o *cut-off*. Segundo a norma ISO 4288:2008 este comprimento é tabelado e de acordo com a rugosidade Ra esperada deve-se variar o comprimento do *cut-off* no rugosímetro. Segundo Machado e Silva (1999) há uma forma de prever o valor aproximado de Ra utilizando-se a equação 7 pode-se prever o valor para utilizado para o *cut-off*.

$$Ra = \frac{f^2}{31,2 \times r_e} \times 1000 \quad (\mu\text{m}) \quad (7)$$

O parâmetro Ra, pode ser empregado nas seguintes situações:

- Controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
- Superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresagem, etc.);
- Superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

Tem-se a Figura 24, que mostra as diferentes faixas de rugosidades da superfície, em Ra, obtidas em relação ao processo de fabricação empregado.

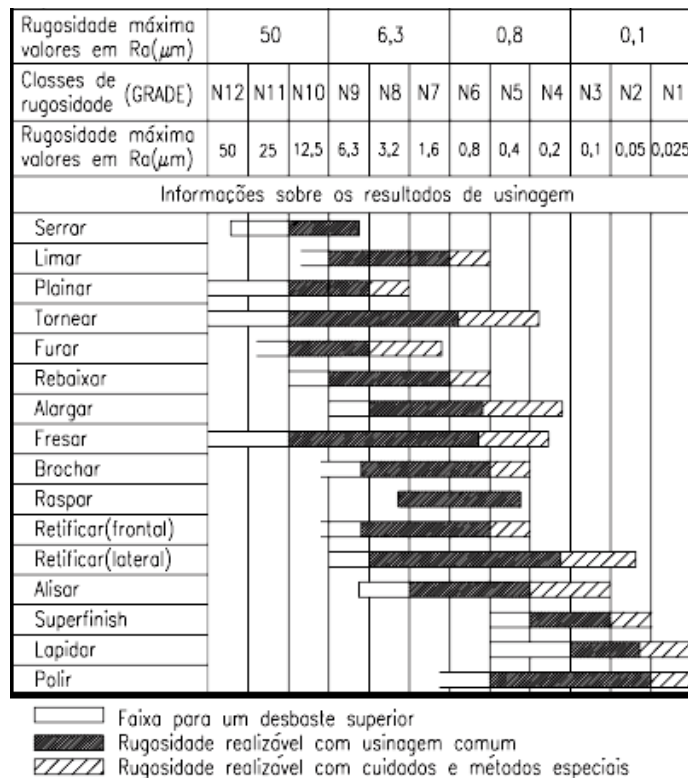


Figura 24 - Rugosidade Ra nos processos de fabricação.
 Fonte: Telecurso, 2000

Vantagens do parâmetro Ra:

- É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo;
- É aplicável à maioria dos processos de fabricação;
- Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica);
- Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor;
- Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

Desvantagens do parâmetro Ra:

- O valor de Ra em um comprimento de amostragem indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito;
- O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, poderemos ter um valor de Ra para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem;
- Nenhuma distinção é feita entre picos e vales.

3 PROPOSTA DE TRABALHO DA EMPRESA

3.1 A EMPRESA

A empresa situada no Distrito Industrial de Cachoeirinha - Rio Grande do Sul, Figura 25, foi fundada pelas empresas alemãs associadas Lunke & Sohn AG e Bleistahl Produktions GmbH & Co. A partir de setembro de 2003 com o novo nome de Bleistahl Brasil Metalurgia S/A. Na época em que foi fundada, fatores econômicos e políticos levaram a Volkswagen a necessitar de um fornecedor de anéis assento de válvula que fosse localizado no Brasil. Assim, os tradicionais fornecedores alemães idealizaram a fundação da empresa. Inicialmente, pensou-se em localizar a futura fábrica no Sudeste. Porém fatores como afinidades culturais e lingüísticas acabaram fazendo com que a decisão pendesse para a região Sul.



Figura 25 - Sede da empresa em Cachoeirinha-RS
Fonte: Bleistahl, 2011

Gradualmente, no decorrer de sua existência, a Lunko Metalurgia, hoje Bleistahl Brasil, sempre contando com o apoio econômico e tecnológico do grupo Bleistahl, que possui empresas em outros países como Alemanha, África do Sul, China e Irã – passou a fornecer também para as outras montadoras além da Volkswagen, sendo hoje, responsável pela fabricação de anéis assento de válvula e de guias de válvula para a maior parte da indústria automobilística nacional.

Com uma área construída de 5000 m², a empresa possui hoje aproximadamente 240 funcionários, aos quais atribui o mérito pelo seu padrão de qualidade. No decorrer de seus 30 anos, a empresa acumulou várias premiações de destaque pela qualidade e fornecimento à indústria automobilística. Foi inclusive agraciada em 1995 com o troféu *“Value to the customer award dê Volkswagen – Konzerns” concedido pela Volkswagen*. Cabe destacar que na ocasião somente cem empresas no mundo e dez no Brasil receberam tal premiação, cabendo a Bleistahl estar entre elas.

A Bleistahl hoje é fornecedora de empresas como Daimler Chrysler, FIAT, Ford, General Motors, International Engines South América, MWM, Perkins, Peugeot, Renault, Tritec, bem como de empresas do exterior como Fiat e Renault da Argentina, Isuzu, Kubota do Japão.

3.2 PEÇAS PRODUZIDAS PELA EMPRESA

Sua produção é de aços sinterizados e é praticamente para atender o mercado de peças automotivas, conforme Figura 26.



Figura 26 - Ítens fabricados pela Bleistahl Brasil.
Fonte: Bleistahl, 2011

3.2.1 Anel sede de válvula

Esse componente é de extrema importância quando falamos da redução de custos de produção, já que, inicialmente ele era usinado no próprio bloco do motor. Com o avanço da tecnologia e solicitações de reduções das massas dos motores

desenvolveu-se blocos em alumínio, fazendo com que esses componentes tenham de ser fabricados de um material que fosse de resistência ao desgaste superior, além de resistir a temperaturas da combustão do motor (SALGADO, 2001 *et al.*).

Ainda, segundo Salgado (2001) *et al.* o conjunto válvula/anel tem de garantir uma resistência ao desgaste considerável. Porém, essa resistência tem de continuar a altas temperaturas e também num meio químico agressivo, caracterizado por uma situação em que haja solicitação mecânica, desgaste, corrosão e erosão.

3.2.2 Guia de válvula

Na fabricação de motores de combustão as guias de válvula são de extrema importância. Segundo Santos (2004) as guias tem por função proteger o motor, que geralmente são feitos de ligas de Alumínio ou F^oF^o do contato constante com as válvulas do motor. O alinhamento deste componente no bloco é muito importante, pois garante uma boa mancalização para as hastes, garantindo um deslizamento com baixo atrito, o que gerando menor nível de ruído, menor consumo de óleo e garantindo uma boa vedação ao conjunto haste-sede de válvula, conforme pode-se observar na Figura 27.

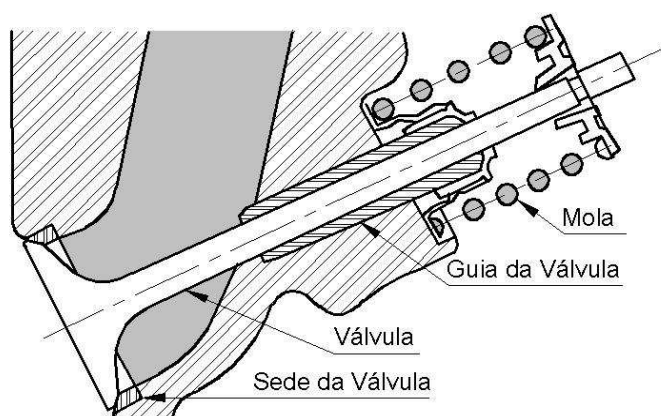


Figura 27 - Montagem de uma guia de válvula no bloco de motor.
Fonte: Santos, 2004

Para evitar falhas de posicionamento e alinhamento da guia, a guia é prensada a frio no bloco. Santos (2004) cita que hoje tem-se usado de centros de usinagem para fazer a usinagem de alargamento, pois, obtém-se assim tolerâncias de usinagem relativamente pequenas para usinagem de peça longa e esbelta, que é o caso da guia de válvula, além de garantir um perfil de rugosidade adequado para o seu funcionamento.

A Figura 28 mostra uma guia que sofreu desgaste e que pode acabar gerando a quebra da válvula. Seu mau funcionamento foi causado pelo excesso de folga no sistema, causado pelo desgaste da guia. Isso explica a aplicação de materiais sinterizados, como o ARS, que tem como propriedade uma boa resistência ao desgaste. Em motores com baixa cilindrada é comum a fabricação da guia de materiais sinterizados ou Latão de alta resistência extrudado em forma de tubos.

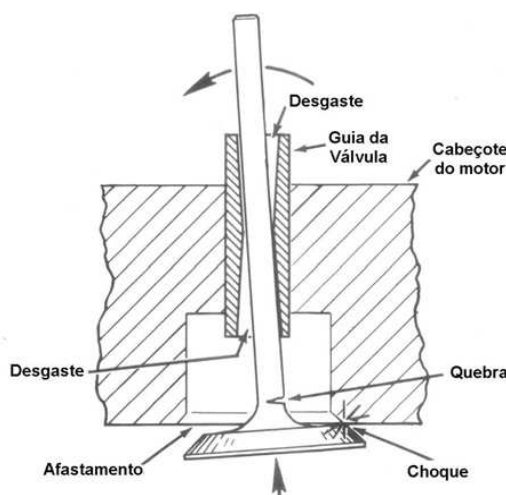


Figura 28 - Guia com desgaste excessivo.
Fonte: LACERDA, 2007 et al.

A quebra ainda não é o único problema do desgaste na guia. Lacerda (2007) *et al.* mostra que óleo pode ser misturado à gasolina no momento da sucção, fazendo uma mistura indesejada do combustível com óleo, que gerará gases indesejados no escape, conforme a Figura 29. Além disso, os resíduos resultantes desta queima podem ainda se depositar sobre a vela de ignição diminuindo a eficiência do motor. O mau funcionamento ainda permanece no momento da exaustão, direcionando o fluxo de óleo para o sistema de escape de gases do motor, conforme Figura 30.

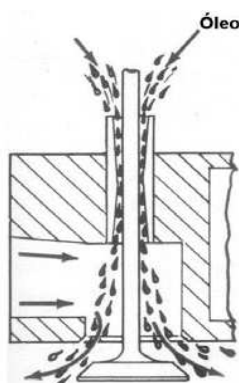


Figura 29 - Entrada de óleo no momento da sucção.
Fonte: LACERDA, 2007 et al.

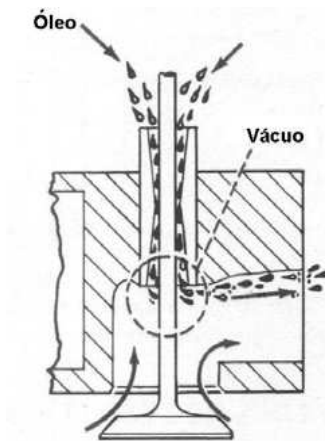


Figura 30 - Entrada de óleo no momento da exaustão.
Fonte: LACERDA, 2007 et al.

O alargamento, por ser um processo de baixa taxa de avanço pode se tornar um gargalo de produção. Em virtude disso, estudos são feitos em diversas áreas para buscar novas tecnologias no processo, buscando novas geometrias e materiais para ferramentas, fluidos de corte mais eficientes e menos poluentes, máquinas rígidas e que atendam as rotações exigidas pelo processo, tudo isso sem deixar de lado a qualidade obtida nos furos (SANTOS, 2004).

4 METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

4.1 TORNO CNC

A máquina utilizada para a realização dos ensaios foi um torno MAZAK, Figura 31, modelo QuickTurn10, com curso no eixo X de 120 mm e no eixo Z de 290mm. Sua torre tem capacidade para 8 ferramentas, sua placa é de fixação hidráulica e a potência nominal do motor é 7,50 kW.



Figura 31 - Torno MAZAK QT10 usado para os ensaios.
Fonte: Autor

4.1.1 Castanhas adaptáveis

Devido a proximidade e possível colisão da plataforma piezelétrica com as castanhas originais da placa do torno foi necessário projetar um sistema de castanhas adaptáveis para que as peças ficassem mais afastadas da placa, sem comprometer a rigidez do sistema. Estas castanhas foram fixadas nas castanhas originais através de parafusos M8, garantindo assim um ganho de 50 mm em relação ao comprimento no eixo Z, conforme Figura 32.

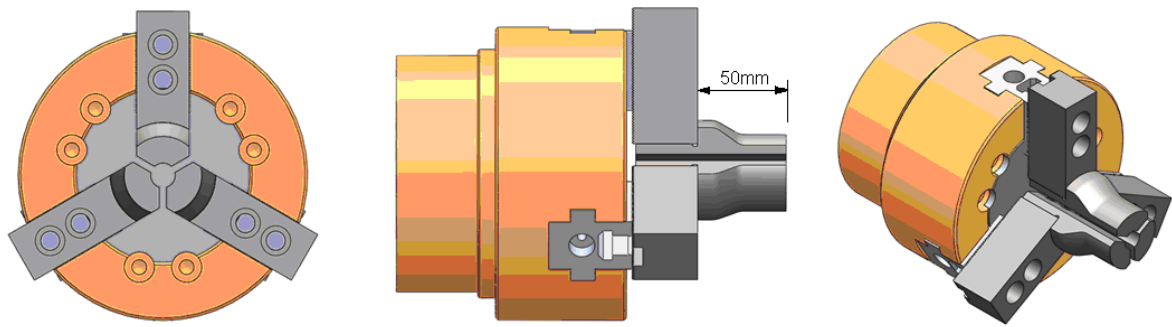


Figura 32 - Sistema de fixação na placa do torno.

Fonte: Autor

Observa-se na Figura 33, sistema com castanhas adaptáveis já fixadas na placa do torno com corpo de prova pronto para ser usinado.

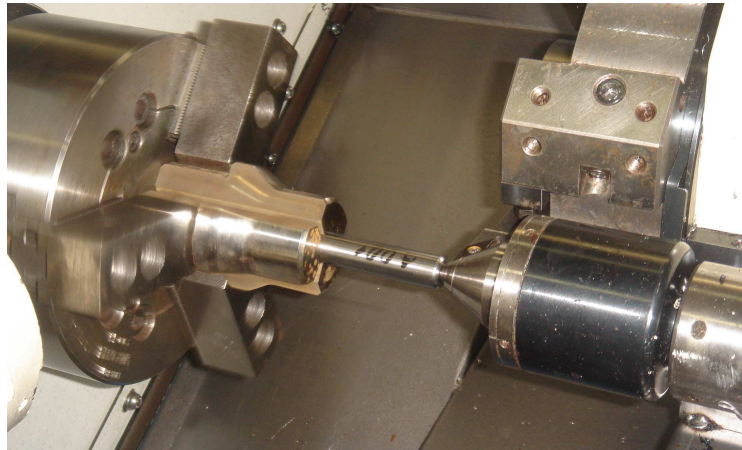


Figura 33 - Imagem das castanhas adaptáveis montadas no torno.

Fonte: Autor

Além do sistema citado anteriormente foi projetado e fabricado um suporte para fixação da plataforma piezelétrica no trocador de ferramentas da máquina. Esse suporte está mostrado na Figura 34 e foi feito de forma a garantir a altura da ferramenta no mesmo alinhamento do eixo da peça bem como manter a rigidez do sistema.

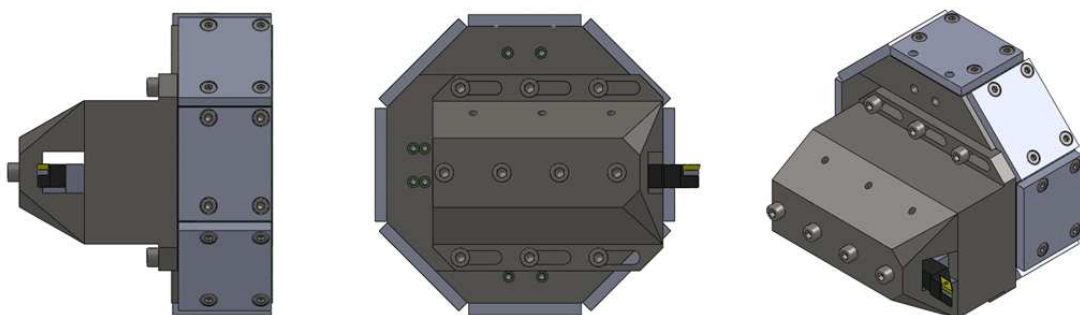


Figura 34 - Sistema de fixação da plataforma piezelétrica.

Fonte: Autor

Com o uso do *software* SolidWorks2010®, Figura 35, foi possível observar, através de simulação de movimentos, que o sistema chegaria próximo ao ponto rotativo e cabeçote móvel, porém, sem haver colisão entre as partes.

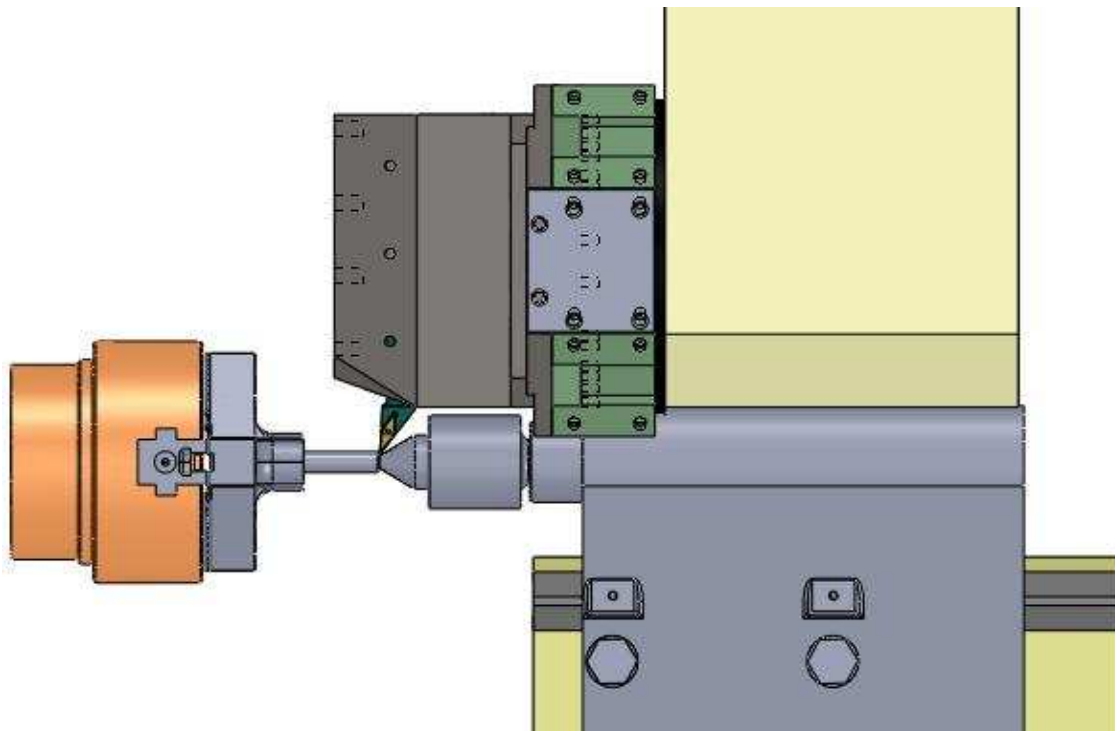


Figura 35 - Simulação no SolidWorks2010® para verificação de colisões.
Fonte: Autor

Na Figura 36 se pode observar que a simulação ficou bem próxima do real e no momento da usinagem o suporte da plataforma ficava próximo ao ponto rotativo.



Figura 36 - Durante o ensaio não houve colisão.
Fonte: Autor

4.2 PLATAFORMA PIEZELÉTRICA

A plataforma utilizada nos ensaios é um transdutor piezelétrico para a medição de forças em três componentes ortogonais F_x , F_y , F_z , marca Kistler®, tipo 9257A, Figura 37.

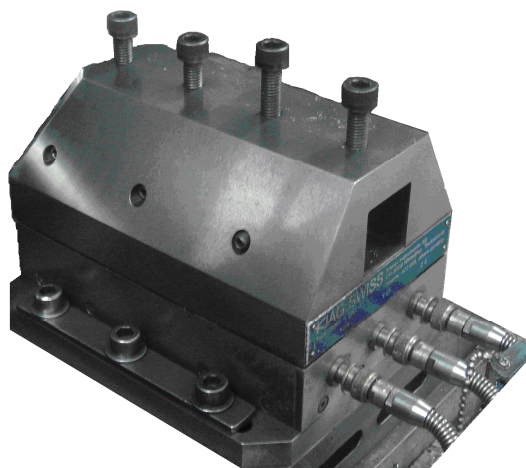


Figura 37 - Plataforma piezelétrica utilizada nos experimentos.
Fonte: Autor

Esta plataforma é constituída de células de quartzo, o que torna um equipamento de medição com grande rigidez. Kuratle (1999), cita como principal característica de um sistema de medição piezelétrica que pequenas variações de força com pré-carregamento relativamente elevado podem ser medidas com exatidão.

4.3 AMPLIFICADORES DE SINAIS

Nos ensaios foram utilizados amplificadores de sinais, marca Kistler®, tipo 5006, Figura 38, que converte a carga gerada pelo transdutor piezelétrico em um sinal elétrico proporcional. A filosofia de operação da Kistler é de orientação por escala. Uma vez que o amplificador for adaptado a um transdutor particular, ele permite trabalhar com escalas fixas graduadas em unidades mecânicas por Volt (M.U./V). A sensibilidade do transdutor empregado e a escala desejada (número de unidades mecânicas por Volt na saída do registrador) são ajustadas no amplificador e após isto nenhuma conversão a partir de pC em V é necessária (KISTLER, 1979).



Figura 38 - Amplificadores de sinais.
Fonte: Autor

O coeficiente de sensibilidade do transdutor, para a conversão de unidades mecânicas em carga elétrica, é ajustado pelo potenciômetro "*Transducer Sensitivity*". A faixa da sensibilidade do transdutor é ajustada através do anel prateado para seleção de uma das cinco faixas marcadas que corresponde aos valores das possíveis sensibilidades do transdutor em pC/M.U. Se a sensibilidade cair dentro da área da sobreposição de duas escalas, em função da exatidão a escala mais baixa deve sempre ser escolhida (KISTLER, 1979). A carga do amplificador tipo 5006 opera com escalas fixas de 1, 2, 5 a 10^n unidades mecânicas por Volt.

4.4 PLACA DE AQUISIÇÃO

A NI6009 é uma placa multifuncional de entrada/saída (I/O) analógica e digital. Segundo o manual da National Instruments®, a resolução de medição da placa para os canais analógicos é de 12 bits, oito entradas analógicas e duas digitais e taxa máxima de amostragem de 48 kS/s, com conexão USB, Figura 39, que foi utilizada com *software* LabView®, versão 2009, também da National Instruments®.



Figura 39 - Placa de aquisição de dados NI6009.
Fonte: National Instruments®, 2011

4.5 SUPORTE E INSERTOS

4.5.1 Suporte

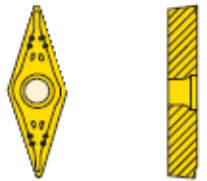
Um dos fatores que influenciou na escolha do melhor suporte para a realização dos ensaios foi a questão de acessibilidade, pois nossa peça de ensaio possui um pequeno diâmetro e para isso necessitamos de uma ferramenta que não compromettesse o ensaio, alcançando o diâmetro final sem colisão com o ponto rotativo e o cabeçote móvel. Assim, escolheu-se o suporte de código: SVJBL 2020K16. Porém, seu comprimento ainda era insuficiente para o ensaio, fazendo-se necessário sua fabricação fora de norma, com comprimento um pouco maior. Optou-se então, por fabricar com comprimento de 170 mm, contrário à norma que seria de 125 mm. Conforme Figura 40.



Figura 40 - Suporte SVJBL2020K16 fabricado.
Fonte: Autor

4.5.2 Inserto

O inserto de MD utilizado para a realização dos ensaios foi de código VBMT160404-F1-CP500 . O quebra-cavaco tipo F1 foi utilizado para acabamento, devido aos baixos parâmetros de corte empregados nos ensaios. O Quadro 2 mostra a forma do quebra-cavaco, bem como os parâmetros de corte recomendados para este.

	F1	Um quebra-cavacos de aplicação versátil e positivo. Geometria positiva com a ponta afiada e fácil de cortar. Adequados para altas taxas de avanço e pequenas profundidades de materiais fundidos e forjados. avanço – 0,10 a 0,50 mm/rot Profundidade de corte – 0,20 a 3,00 mm
---	----	--

Quadro 2 - Forma do quebra-cavaco e faixa de avanço.
Fonte: SecoTools®, 2009

Para os ensaios utilizou-se um inserto para acabamento pois trabalhou-se com a_p e f baixos. A Figura 41 mostra as medidas do inserto, bem como a classe de MD utilizada no ensaio.

Inserts	Part No.	Grades																			
		Coated										Uncoated				Cermet					
		TP1000	TP1500	TP2000	TP2500	TP3000	TP200	TP40	TM2000	TM4000	TK1000	TK2000	TS2000	TS2500	CP500	HX	KX	883	890	CMP	CM
VBMT-F1 	VBMT 110202-F1																				
	110204-F1																				
	110208-F1																				
	VBMT 110302-F1																				
	110304-F1																				
	110308-F1																				
	VBMT 160402-F1																				
	160404-F1																				
	160408-F1																				
	160412-F1																				

Figura 41 - Características e dimensões da pastilha VBMT 160404 – F1.
Fonte: Seco Tools®, 2009

Com o intuito da medição de desgaste da ferramenta procurou-se utilizar uma classe de ferramentas que tivesse a menor resistência ao desgaste possível, além disto, também seria interessante que a pastilha obtivesse uma tonalidade de cor clara, para facilitar a medição do desgaste no microscópio. Dentre as opções disponíveis optou-se por utilizar uma classe de ferramentas da Seco Tools®. A classe escolhida foi a CP500, cuja característica é resistência a tenacidade e baixa resistência ao desgaste, conforme Figura 42.

	Grades	P					M					K					N				S				H			
		P01 P10 P20 P30 P40 P50	M01 M10 M20 M30 M40	K01 K10 K20 K30 K40	N01 N10 N20 N30	S01 S10 S20 S30	H01 H10 H20 H30																					
CVD	TP1000																											
	TP1500																											
	TP2000																											
	TP2500																											
	TP3000																											
	TP200																											
	TP40																											
	TM2000																											
PVD	TM4000																											
	TK1000																											
	TK2000																											
	TS2000																											
	TS2500																											
	CP200																											
	CP250																											
	CP500																											
Cermet	CM/CMP																											
	890																											
	HX																											
	KX																											
	883																											

Figura 42 - Classes de MD da SECO TOOLS.
Fonte: Seco Tools®, 2009

Observa-se na Figura 43 que a o grão de MD da classe CP500 é menor que a CP250, sendo recomendado seu uso em desbastes médios e em acabamentos. (SECO TOOLS, 2009).

	CP250	Tougher alternative to CP200. CP250 is principally intended for roughing operations on superalloys and titanium alloys. (Ti,Al)N + TiN
	CP500	A very tough micrograin intended for finishing and medium roughing of stainless steel. Can handle intermittent cutting operations very well. CP500 is also an alternative for aluminium alloys. (Ti,Al)N + TiN

Figura 43 - Estrutura do revestimento da classe CP500.

Fonte: Seco Tools®, 2009

A Figura 44 mostra os elementos químicos presentes nas classes de MD. Em destaque está a classe usada CP500. Na camada de substrato estão presentes: W, Co, Cr e C. Na cobertura estão presentes: (Ti, Al)N + TiN.

Grade	Cemented carbide										Coating				
	W	Ti	Ta	Nb	Co	Cr	Ni	Mo	C	N	Ti	Al	C	N	O
CM	■	■	■	■	■		■	■	■	■					
CMP	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■		■	
CP200	■				■	■			■		■	■		■	
CP250	■		■		■				■		■	■		■	
CP300	■	■	■	■	■				■		■	■		■	
CP500	■	■	■	■	■	■			■		■	■		■	
CP600	■				■	■			■		■	■		■	
C15M	■	■	■	■	■		■	■	■	■					
DP2000	■		■	■	■				■		■	■	■	■	■
F15M	■				■	■			■		■	■		■	
F25M	■	■	■	■	■				■		■	■		■	
F30M	■				■	■			■		■	■		■	
F40M	■				■	■			■		■	■		■	

Figura 44 - Elementos químicos presentes na classe CP500.

Fonte: Seco Tools®, 2009

4.6 PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Com o objetivo de verificar a influência da adição do Boro na usinabilidade do material os parâmetros de corte empregados nos ensaios foram sempre os mesmos, Tabela 3, pois assim, os ensaios poderiam ser comparados entre si. Realizou-se 6 passes em cada corpo de prova reduzindo o diâmetro em 0,60 mm a cada passada. Partiu-se de 14,40 mm na primeira medida e chegou-se a 10,80 mm no diâmetro final. O comprimento de usinagem foi de 50,00 mm no primeiro passe e a cada

profundidade reduziu-se 0,30 mm no comprimento para evitar o contato de toda a aresta de corte no final do passe.

Tabela 3 - Parâmetros de corte empregados nos ensaios.

Parâmetro	Notação	Valor	Unidade
Velocidade de corte	v_c	100	m/min
avanço	f	0,10	mm/rot
Profundidade de corte	a_p	0,30	mm

Fonte: Autor

4.7 MEDIÇÃO DA FORÇA DE CORTE, FORÇA DE AVANÇO E FORÇA PASSIVA

Para a medição das forças de corte, de avanço e passiva nos ensaios em torneamento longitudinal foi utilizada a arquitetura do sistema experimental, formado de um conjunto de instrumentos de medição e equipamentos descritos na Figura 45, sendo constituídos por: (A) plataforma piezelétrica, (B) amplificadores de sinais, (C) placa de aquisição e conversão de sinais, (D) *software* LabView® e *notebook*.

As forças foram medidas na peça 01, seguida da peça de número 20, 40, 60, 80, 100 e 120.

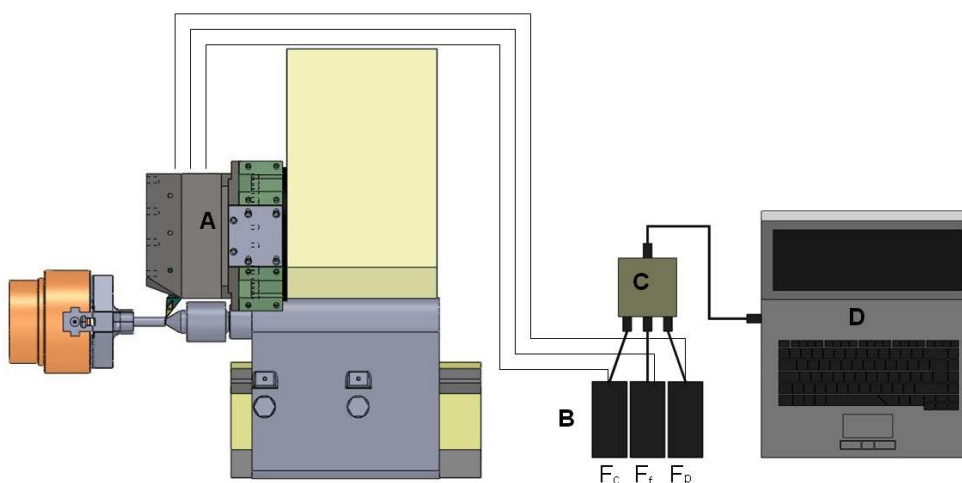


Figura 45 - Esquema do sistema de aquisição de dados de força.

Fonte: Autor

Todos os valores de F_c , F_f e F_p foram coletados e armazenados no computador ao mesmo tempo em que foram visualizados na tela, Figura 46. Os valores para utilização na geração dos gráficos foram obtidos a partir da média retiradas no segundo passe de cada peça. Esta sistemática foi adotada para todas as determinações das componentes da força de Usinagem (F_c , F_f e F_p) e usados para geração de gráficos para posterior análise.

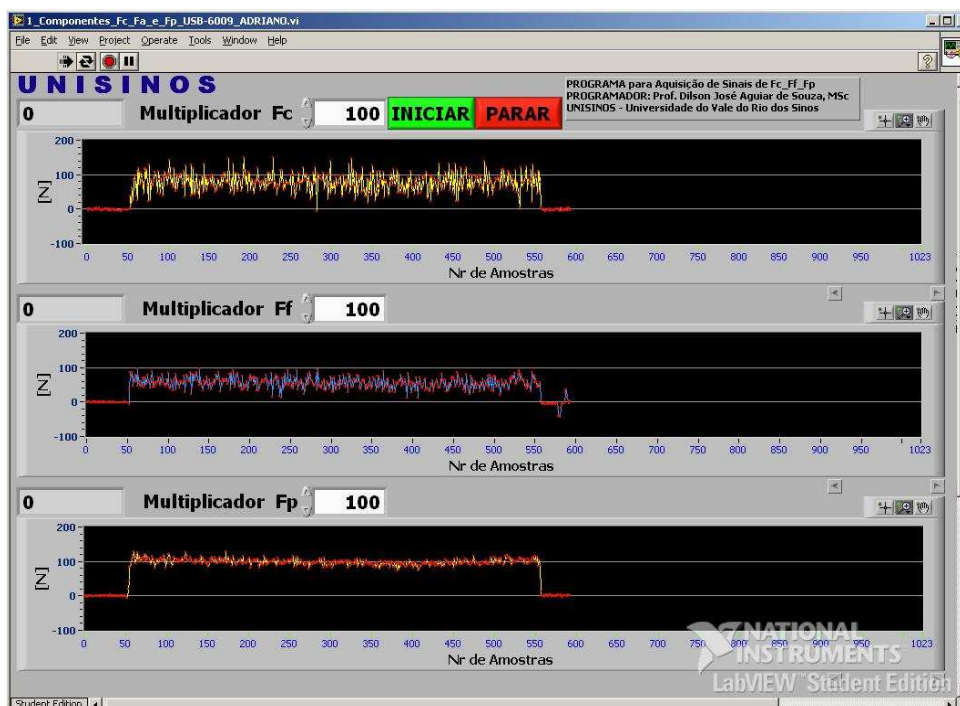


Figura 46 - Exemplo de gráfico gerado na aquisição de F_c , F_f e F_p , liga original.
Fonte: Autor

4.8 MEDIÇÃO DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS

A medição do desgaste deu-se no flanco principal da ferramenta através do desgaste de flanco VB_{Bmax} representado na Figura 18. Como critério para fim de vida, considerou-se um lote de 120 peças, quantidade esta tendo como base em ensaios preliminares. Pode-se observar pela Figura 47 um estudo feito no *software* SolidWorks2010[®] simulando a região da área de corte e como ficaria o desgaste no inserto. Observa-se que o desgaste comportou-se como o simulado (Figura 48).

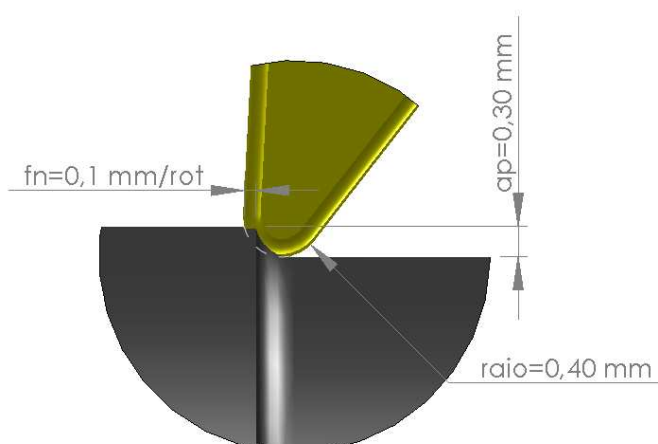


Figura 47 - Simulação da área sendo usinada, em *software* SolidWorks2010[®].
Fonte: Autor

A Figura 48 mostra a região de atuação da ponta da ferramenta no processo de usinagem, demonstrada no esquema da Figura 47.

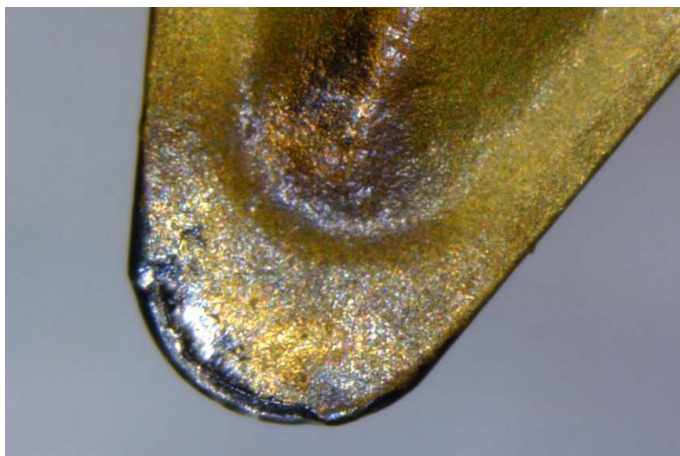


Figura 48 - Desgaste de cratera, lote original ao final de 120 peças (Zoom – 155x).
Fonte: Autor

A medição do desgaste de flanco também foi realizado após leitura das componentes de força F_c , F_f e F_p nos corpos de prova de número 01, 20, 40, 60, 80, 100 e 120.

4.8.1 Microscópio

Para identificar o desgaste VB_{Bmax} utilizou-se um microscópio estereoscópico, com capacidade de ampliação de 230x. O equipamento utilizado foi da marca Digital DinoCapture[®] 2.0, versão 1.2.7 modelo DinoLite, conectado ao *notebook* via USB com o auxílio do seu próprio *software* DinoCapture[®] 2.0. Observa-se na Figura 49 o sistema montado para a obtenção das fotos e medição do desgaste.

O inserto foi retirado do suporte e colocado em dispositivo para a fixação do mesmo, na qual foi realizada a aquisição das fotos do flanco, lateral e topo, bem como as medições dos desgastes. Após a medição, o inserto foi recolocado na máquina, continuando a usinagem até o limite de 120 peças, quantidade esta estipulada como sendo o término do lote.

Para iniciar os trabalhos de medição foi necessário fazer a calibração do *software*. Essa calibração foi feita utilizando-se de um elemento com medida conhecida, aplicando o mesmo zoom (217X) utilizado nos ensaios. Neste caso, utilizou-se parte de escala de um paquímetro, aferido pelo Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão - CETEMP, conforme Figura 50.

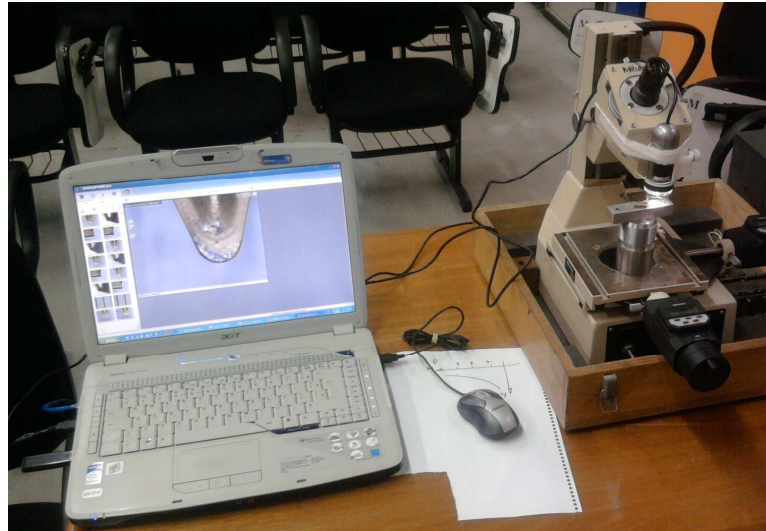


Figura 49 - Sistema para medição do desgaste.
Fonte: Autor

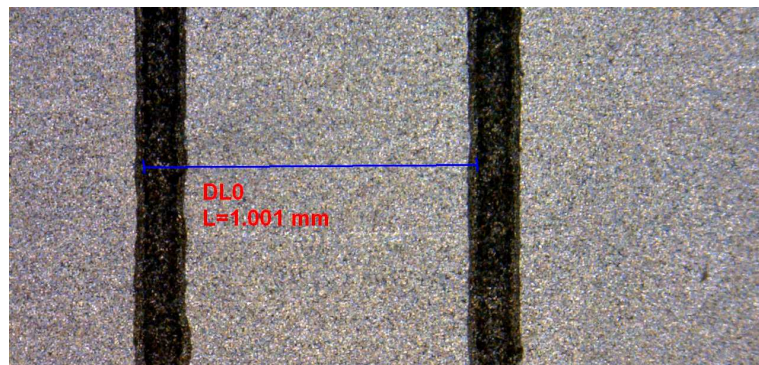


Figura 50 - Instrumento utilizado para calibração do software DinoCapture® 2.0.
Fonte: Autor

Tem-se a Figura 51 que mostra como fica a medição com o auxílio do *software* DinoCapture® 2.0.

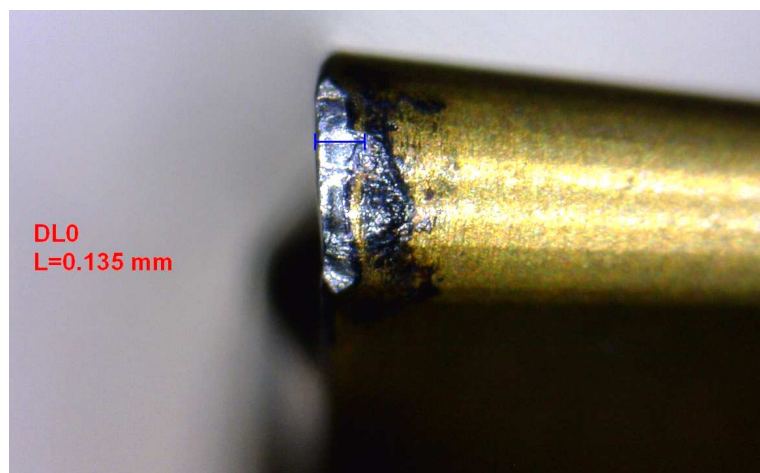


Figura 51 - Medição de desgaste máximo de flanco em software DinoCapture® 2.0.
Fonte: Autor

4.9 MATERIAIS ENSAIADOS

4.9.1 Corpos de Prova

Durante os ensaios, foram usinados corpos de prova (guias de válvula), retirados da linha de produção da empresa parceira, pertencentes a mesmo lote de fabricação. Foram cedidos 2000 guias de ARS para os ensaios, sendo 400 guias de cada porcentagem. O corpo de prova em questão é uma guia de válvula automotiva, montada em blocos de alumínio em motores a combustão interna. Tem-se no anexo 1 os dados da liga original, detalhando sua composição química.

Cada lote de 400 peças era diferenciado apenas do percentual do elemento químico Boro em forma de Nitreto Hexagonal. O Nitreto de Boro Hexagonal (HBN) em pó tem uma estrutura e propriedades semelhantes ao grafite. Tornou-se um dos lubrificantes mais populares, devido às suas propriedades lubrificantes e inércia para fundição de metais e sais. É utilizado em diversas aplicações, especialmente como um agente de desmoldagem (ALLAM, 1991).

Para facilitar a rastreabilidade e documentação dos ensaios utilizou-se a seguinte nomenclatura para os corpos de prova, conforme Quadro 3. Esta nomenclatura foi necessária porque as amostras são praticamente idênticas e impossíveis de diferenciá-las sem ajuda de microscopia ótica.

Para fim de estudos estatísticos foi-se necessário a realização de mais de um ensaio em cada amostra. Para tal, dividiu-se as 400 peças em 3 lotes de 120 peças cada, dando esse limite como fim de vida da ferramenta. Com os dados dos 3 lotes fez-se as médias para então tomar como base os dados dos ensaios.

Guia	Nomenclatura
Composição original	original
Adição de 0,05% de Nitreto de Boro Hexagonal	0,05%HBN
Adição de 0,10% de Nitreto de Boro Hexagonal	0,10%HBN
Adição de 0,15% de Nitreto de Boro Hexagonal	0,15%HBN
Adição de 0,20% de Nitreto de Boro Hexagonal	0,20%HBN

Quadro 3 - Nomenclatura das amostras.

Fonte: Autor

4.9.1.1 Controle dimensional das peças

Primeiramente fez-se um controle para verificar a variação dimensional do diâmetro e comprimento dos corpos de prova. Para essas medições utilizou-se um micrômetro externo de 0-25 mm com resolução de 0,001 mm. Mediu-se um lote de 11 peças para ter uma amostra considerável. Através dos dados da Tabela 4 verifica-se que a variação nas medidas do diâmetro é muito baixa e que não influenciaria no ensaio.

As medidas de projeto da peça para usinagem estão detalhadas no desenho em 2D que está no anexo 2 deste trabalho.

Tabela 4 - Dimensional dos corpos de prova.

Peça	Extremos		Centro	Média (mm)	Desvio padrão
	A (mm)	B (mm)	C (mm)		
1	14,348	14,347	14,347	14,3473	0,000577
2	14,350	14,345	14,345	14,3467	0,002887
3	14,347	14,346	14,346	14,3463	0,000577
4	14,347	14,343	14,346	14,3453	0,002082
5	14,346	14,347	14,345	14,3460	0,001000
6	14,350	14,345	14,344	14,3463	0,003215
7	14,346	14,347	14,347	14,3467	0,000577
8	14,347	14,349	14,346	14,3473	0,001528
9	14,346	14,346	14,346	14,3460	0
10	14,347	14,350	14,345	14,3473	0,002517
11	14,346	14,346	14,347	14,3463	0,000577

Fonte: Autor

4.9.1.2 Medição de dureza

Em cada lote de amostra verificou-se a dureza em escala Brinell (HB). Realizou-se o corte da seção transversal da peça para efetuar 3 medições por amostra. O restante deste material aproveitou-se para fazer análise micrográfica.

As medições em escala Brinell foram feitas no durômetro Brinell HPO 250, Figura 52, utilizando a norma NM-ISO 6506-1 como referência para os procedimentos. Utilizou-se de uma esfera com diâmetro de 2,50 mm e carga de 62,50 kgf. Como parte do procedimento verificou-se a medida da calota esférica gravada na peça e fez-se a medição na tela do durômetro, Figura 52. De posse das medições das calotas utilizou-se a tabela da norma e verificou-se as durezas de acordo com a Tabela 5.



Figura 52 - Durômetro Brinell/Vickers utilizado no ensaio.
Fonte: Autor

De posse dos valores obtidos nas medições da Tabela 5 plotou-se Gráfico 1 que mostra que a dureza das amostras tendem a diminuir com a adição do HBN.

Tabela 5 - Medição da dureza das amostras.

Guia	Medição 1 Brinell (HB)	Medição 2 Brinell (HB)	Medição 3 Brinell (HB)	Média Brinell (HB)
original	233,40	225,40	233,40	230,73
0,05%HBN	217,90	217,90	225,40	220,40
0,10%HBN	217,90	210,70	210,70	213,10
0,15%HBN	210,70	203,80	210,70	208,40
0,20%HBN	203,80	203,80	203,80	203,80

Fonte: Autor

Utilizou-se de 3 medições em cada amostra para fazer uma verificação quanto à confiabilidade dos resultados, pois trata-se de um material poroso e que no momento de uma medição pode ter influenciado no resultado.

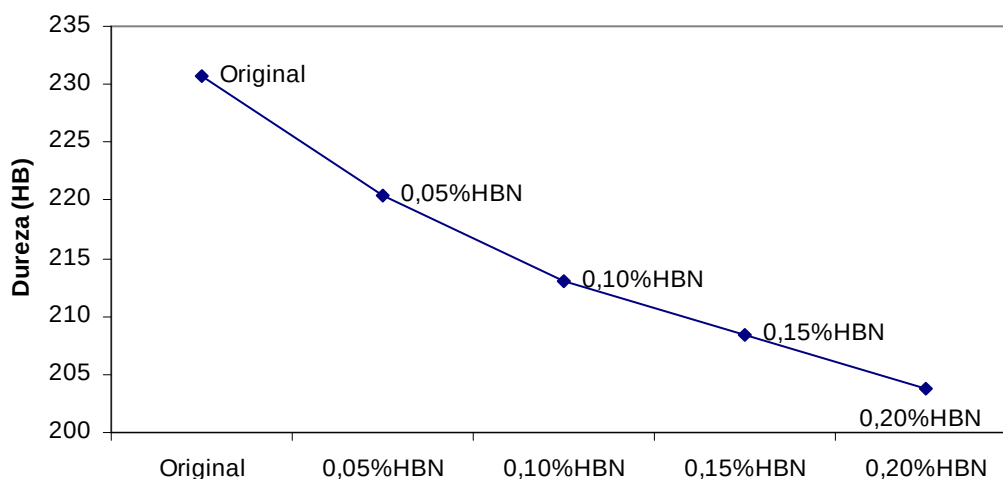


Gráfico 1 - Média das durezas das amostras.

Fonte: Autor

4.9.1.3 Análise micrográfica

Como o corte da peça havia sido feito para a medição de dureza, utilizou-se então do restante do material para realizar a análise micrográfica. As amostras foram embutidas em resina acrílica na forma apropriada e mais recomendada para aquele tipo de amostra. Com a amostra embutida levou-se para a etapa de lixamento, onde utilizou-se lixas de 80 grãos/in² em forma de cinta rotativa e depois começou-se a fazer o lixamento manual em 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200 grãos/in².

Para fazer a etapa de acabamento e polimento utilizou-se uma politriz rotativa da marca Pantec, modelo Polipan II, Figura 53. A pasta diamantada abrasiva de semi-acabamento utilizada no polimento foi de 3 µm e a de acabamento foi de 1 µm.

Para a verificação da micrografia das amostras e captura das imagens utilizou-se de um microscópio Union Versamet II, conforme Figura 54. O ataque químico realizado foi com reagente em solução NITAL3% + PICRAL3%.



Figura 53 - Politriz PANTEC utilizada para o polimento das amostras.
Fonte: Autor



Figura 54 - Microscópio Union Versamet II utilizado na captura de imagens das amostras.
Fonte: Autor

Na análise micrográfica é possível notar uma diferença nas amostras de Figura 55 até Figura 59 com relação à sua porosidade. Analisando-se as figuras é possível observar que há uma tendência da diminuição da quantidade de poros na amostra. Observa-se que a amostra original (Figura 59) apresenta a maior quantidade de poros que as outras. Segundo estudos feitos em ARS com outras composições o HBN adicionado tende a aglomerar-se nos poros do material e atuando no contorno do grão, diminuindo a quantidade de poros e a dureza da liga (ALLAM, 1991).

**Sinterizado da guia
com adição de 0,05%
de Nitreto de Boro
Hexagonal**

Propriedades:

– Densidade aparente:
6,95g/cm³
– Média de Dureza:
220 HB

Composição química:

C : 0,20 – 0,50%
Mo : 1,00 – 2,00%
Cr : 2,50 – 3,50%
S : 0,25 – 0,75%
B : Traços
N : Traços
Fe : Balanço

Metalografia:

Matriz predominante
Bainítica (Fe-C-Mo-Cr)
Lubrificante sólidos
finos dispersos (MoS₂+
HBN Imperceptível)

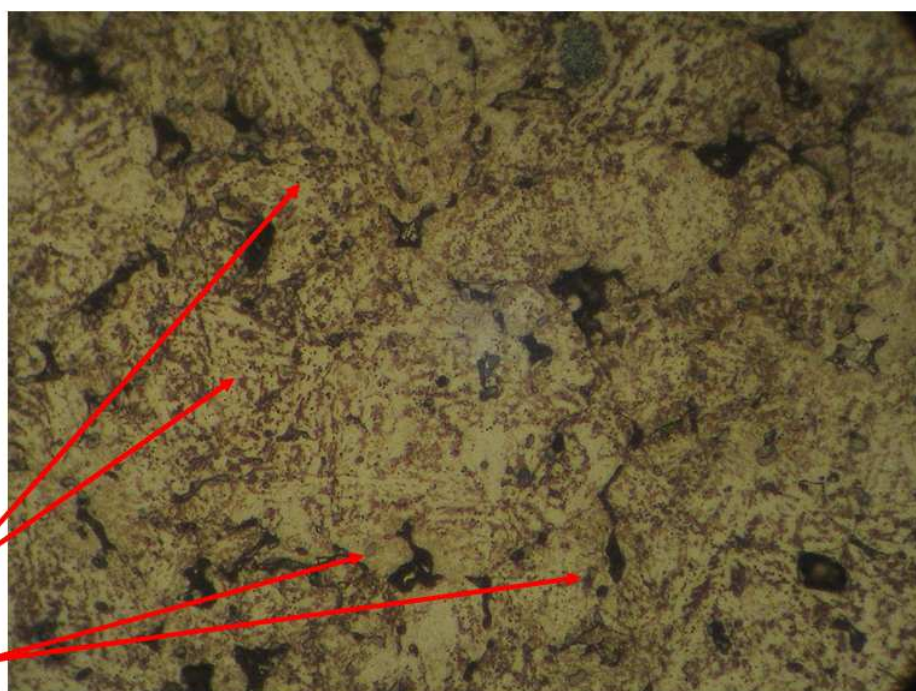


Figura 55 - Microestrutura sinterizado 0,05%HBN - Zoom 340x
Fonte: Autor

**Sinterizado da guia
com adição de 0,10%
de Nitreto de Boro
Hexagonal**

Propriedades:

– Densidade aparente:
6,92g/cm³
– Média de Dureza:
213 HB

Composição química:

C : 0,20 – 0,50%
Mo : 1,00 – 2,00%
Cr : 2,50 – 3,50%
S : 0,25 – 0,75%
B : Traços
N : Traços
Fe : Balanço

Metalografia:

Matriz predominante
Bainítica (Fe-C-Mo-Cr)
Lubrificante sólidos
finos dispersos (MoS₂ +
HBN Imperceptível)

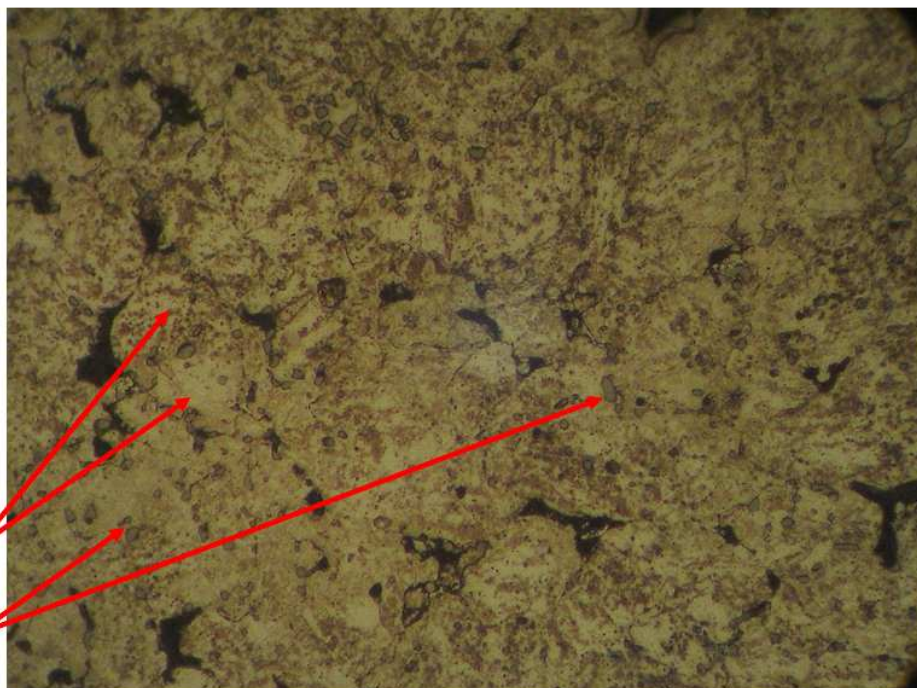


Figura 56 - Microestrutura sinterizado 0,10%HBN - Zoom 340x
Fonte: Autor

**Sinterizado da guia
com adição de 0,15%
de Nitreto de Boro
Hexagonal**

Propriedades:

– Densidade aparente:
6,89g/cm³
– Média de Dureza:
208 HB

Composição química:

C : 0,20 – 0,50%
Mo : 1,00 – 2,00%
Cr : 2,50 – 3,50%
S : 0,25 – 0,75%
B : Traços
N : Traços
Fe : Balanço

Metalografia:

Matriz predominante
Bainítica (Fe-C-Mo-Cr)
Lubrificante sólidos
finos dispersos (MoS₂ +
HBN Imperceptível)

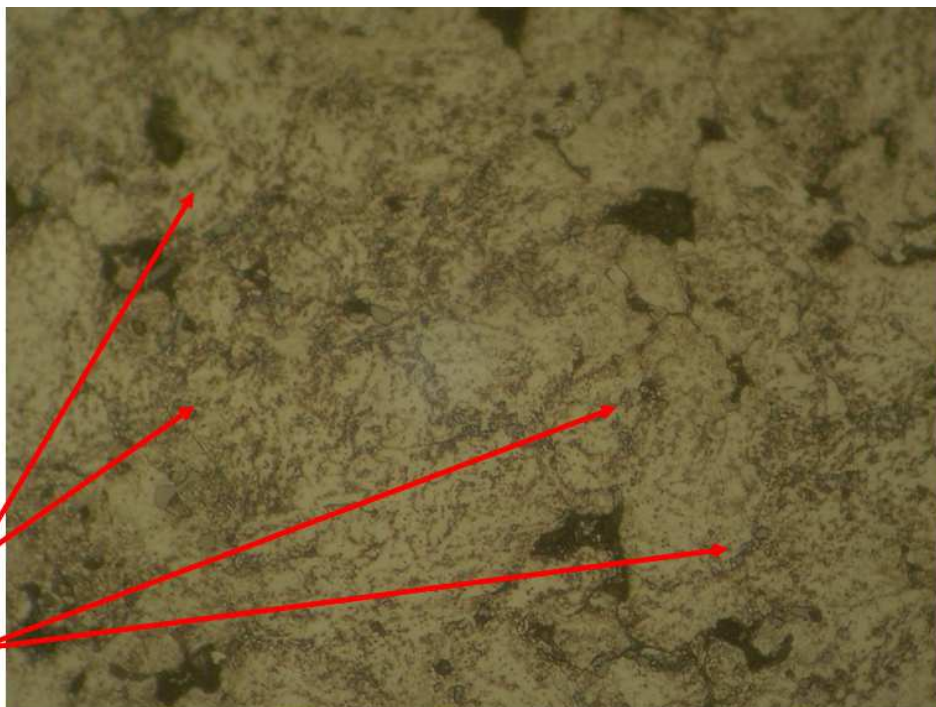


Figura 57 - Microestrutura sinterizado 0,15%HBN - Zoom 340x
Fonte: Autor

**Sinterizado da guia
com adição de 0,20%
de Nitreto de Boro
Hexagonal**

Propriedades:

- Densidade aparente:
6,89g/cm³
- Média de Dureza:
203 HB

Composição química:

- C : 0,20 – 0,50%
- Mo : 1,00 – 2,00%
- Cr : 2,50 – 3,50%
- S : 0,25 – 0,75%
- B : Traços
- N : Traços
- Fe : Balanço

Metalografia:

- Matriz predominante
Bainítica (Fe-C-Mo-Cr)
- Lubrificante sólidos
finos dispersos (MoS₂ +
HBN Imperceptível)

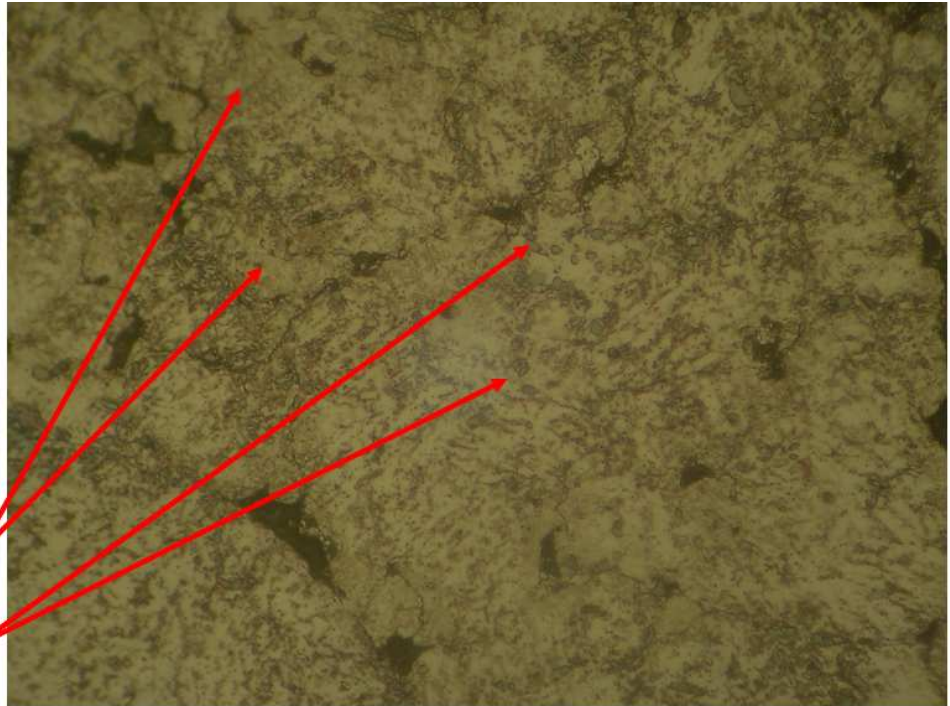


Figura 58 - Microestrutura sinterizado 0,20%HBN - Zoom 340x
Fonte: Autor

**Sinterizado da guia
de válvula Original**

Propriedades:

- Densidade aparente:
6,98g/cm³
- Média de Dureza:
231 HB

Composição química:

- C : 0,20 – 0,50%
- Mo : 1,00 – 2,00%
- Cr : 2,50 – 3,50%
- S : 0,25 – 0,75%
- Fe : Balanço

Metalografia:

- Matriz predominante
Bainítica (Fe-C-Mo-Cr)
- Lubrificante sólidos
finos dispersos (MoS₂)

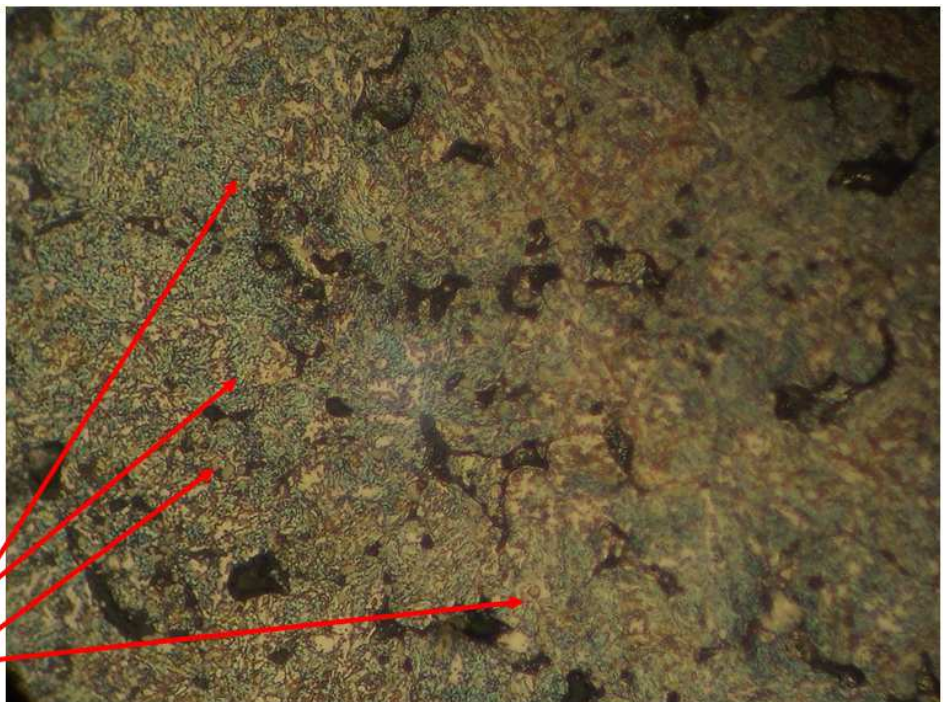


Figura 59 - Microestrutura sinterizado original - Zoom 340x
Fonte: Autor

4.9.1.4 Medição da rugosidade Ra

A qualidade da superfície usinada nos corpos de prova foi medida através do parâmetro de rugosidade Ra. Os valores da rugosidade foram obtidos através de três medições executadas ao longo do comprimento útil de 50 mm, isto é, perpendicular ao avanço nos processos de torneamento cilíndrico. Para determinar o valor de *cut-off* utilizado nas medições utilizou-se a equação 7. Aplicando-se a equação 7 e com base nos dados da Tabela 3 encontrou-se o valor de Ra de 0,801 mm. Então, com base nos dados da norma ABNT NBR ISO 4288:2008 utilizou-se um *cut-off* de 0,80 mm, pois encontra-se na faixa de 0,1 a 2,0mm.

Para execução das medições utilizou-se um rugosímetro digital da marca PANTEC, modelo 14134-R montado na ponteira de um traçador de altura e um prisma em V magnético para fazer a fixação das peças, Figura 60, garantindo o mesmo posicionamento em todas as amostras medidas. Foram realizadas três medições em cada corpo de prova, fazendo a média aritmética dos valores encontrados.



Figura 60 - Sistema montado para medir rugosidades.
Fonte: Autor

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por se tratar de um material poroso, verificou-se variação das componentes de força de Usinagem durante os ensaios, conforme Figura 46. Com o intuito de analisar se havia algum problema em relação à vibração que influenciaria durante os ensaios realizou-se um teste com 3 amostras de aço SAE 1045. Utilizou-se para isso, as mesmas medidas do corpo de prova de ARS, bem como o mesmo programa CNC para a realização do ensaio de teste. Mostra-se pela Figura 61 que o comportamento das forças de corte, avanço e passiva no corte do aço SAE 1045 manteve-se praticamente constante, o que leva a concluir que o comportamento das forças registradas no ensaio das amostras de ARS pode ser validado e realmente entendido como um material poroso (JESUS FILHO, 2006).

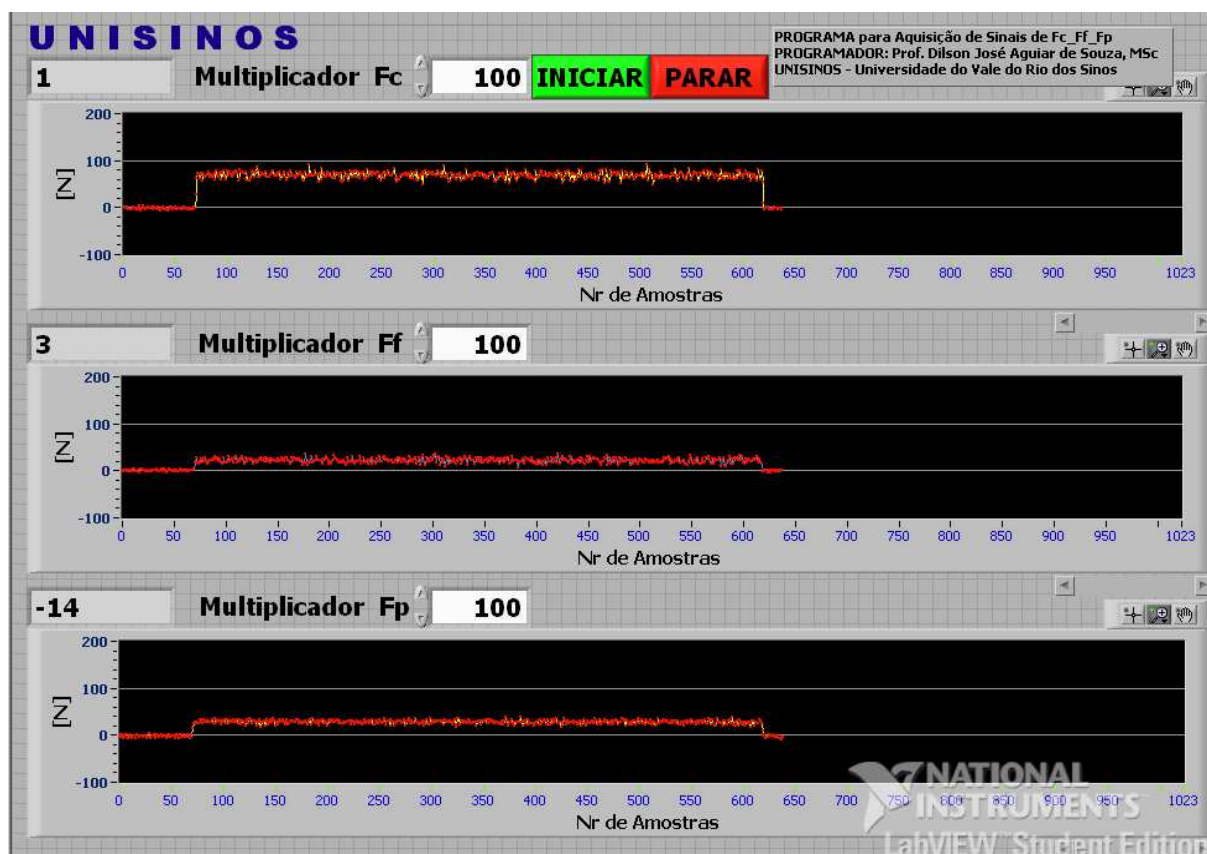


Figura 61 - Comportamento de forças registradas durante ensaio de teste com SAE 1045.
Fonte: Autor

Para facilitar o entendimento e clareza das explicações os dados num primeiro momento foram separados e organizados por dados de força, ou seja, força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p).

A fim de manter uma padronização para os dados do trabalho utilizou-se o mesmo padrão de gráficos para todas as forças, com o intuito de deixar claro a diferença de valores entre elas.

Utilizou-se também os dados da medição de desgaste da ferramenta para plotar gráficos comparando as amostras.

5.1 MEDIÇÃO DE FORÇAS

Durante os ensaios mediu-se as forças de corte, avanço e passiva necessárias para fazer o corte do corpo de prova. Os dados que foram usados para gerar as médias dos valores estão no anexo 3, separados por tipo de força, lote e por composição da liga do ARS.

Para deixar claro e mostrar de uma forma objetiva os dados foram plotados gráficos comparando as ligas.

5.1.1 Força de corte

Nota-se que com o aumento do número de peças usinadas a força de corte tende a aumentar devido ao desgaste da ferramenta. Observa-se pelos dados da Tabela 6 e Gráfico 2 que com o aumento do teor de HBN na liga a força de corte tende a diminuir, com relação as componentes das forças de Usinagem da liga original.

Observa-se que os primeiros dados já mostram que a liga com composição original apresentou maiores valores. As ligas com 0,15% e 0,20% apresentam os menores valores respectivamente.

O valor máximo obtido das médias ocorreu na composição original, tendo pouca diferença se comparado ao de 0,05%HBN, o que mostra que a adição de apenas 0,05% de HBN não proporcionou modificações.

Ao comparar o fim do lote de 120 peças da composição original com a de 0,20%HBN nota-se uma redução de aproximadamente 29,10 % o que leva a acreditar que a adição do elemento HBN ajuda a diminuir a força de corte necessária para cortar o material.

Os valores observados nas ligas de composição 0,15%HBN e 0,20%HBN satisfazem as expectativas esperadas até o presente momento, pois apresentam,

respectivamente, uma redução de 21,3 % e 29,10 % da força de corte se comparada à liga de composição original.

Tabela 6 - Média dos dados de força de corte em N.

Peça	0,05%HBN	0,10%HBN	0,15%HBN	0,20%HBN	original
1	53,62	55,69	47,89	49,27	58,40
20	60,47	60,61	51,28	54,54	62,50
40	60,61	61,23	52,46	51,47	63,63
60	65,99	62,72	56,45	52,08	67,94
80	67,81	67,64	55,42	53,48	69,50
100	74,69	71,10	56,89	50,73	74,78
120	77,89	73,62	60,34	56,05	78,61

Fonte: Autor

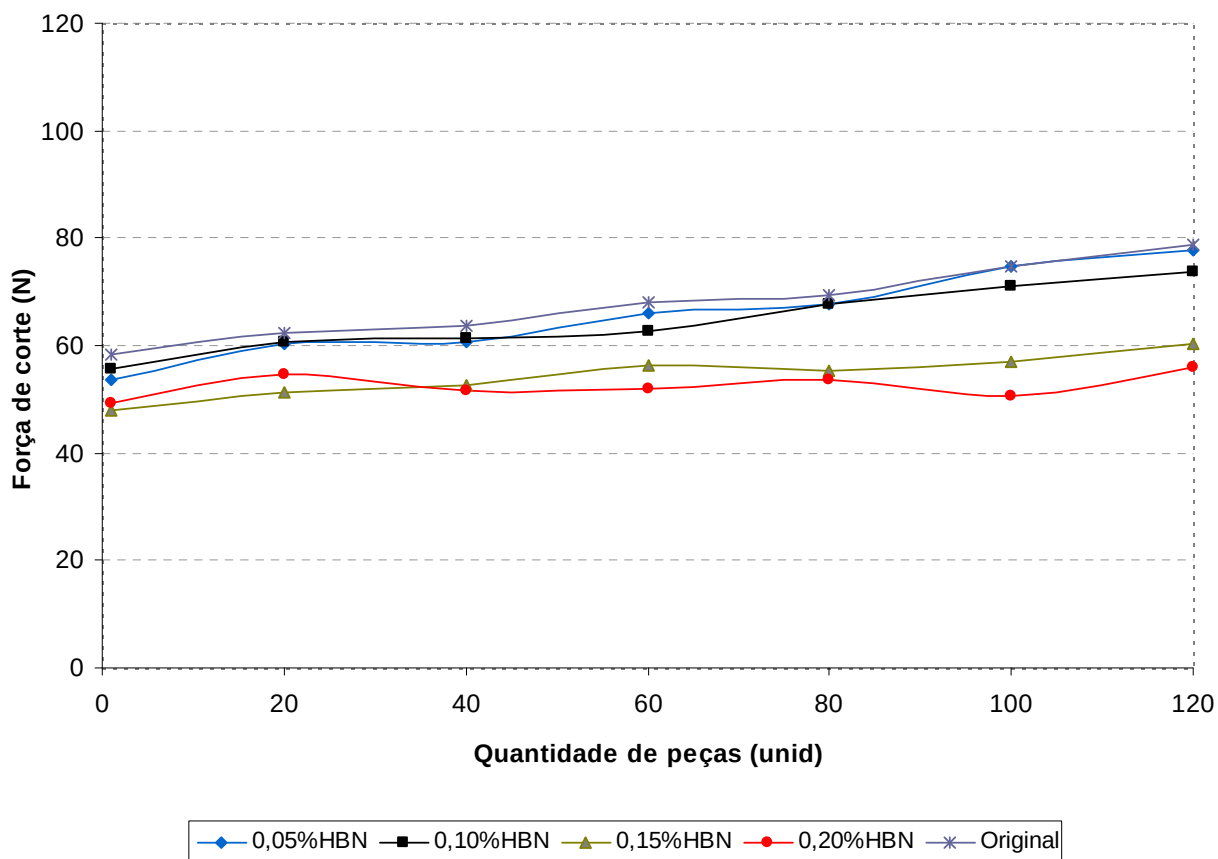


Gráfico 2 - Média dos dados de força de corte.

Fonte: Autor

5.1.2 Força de avanço

Os dados da força de avanço da primeira peça de cada amostra mostram que não há muita variação entre as composições, porém, com o aumento do número de peças a usinar houve o aumento desta força, devido ao desgaste da ferramenta.

A liga de composição 0,10%HBN é a que apresenta a maior força de avanço entre as amostras ao fim do lote de 120 peças, conforme Tabela 7, aumentando em torno de 300 % do seu valor inicial.

Observa-se também através dos dados da Tabela 7 e do Gráfico 3 que a liga com composição de 0,20%HBN apresenta a menor força de avanço entre as amostras, variando 76 % do início até o final do lote de 120 peças.

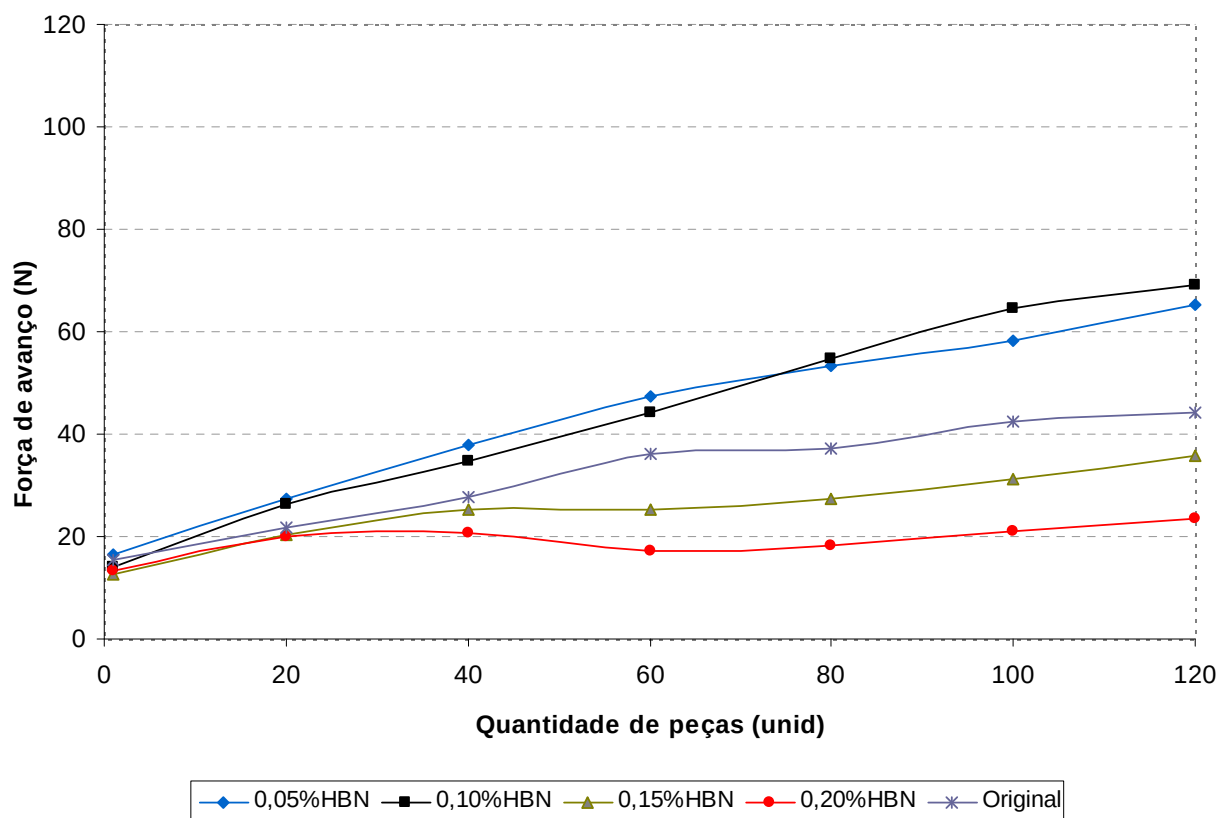
Ao comparar a liga com composição de 0,05%HBN com a de 0,20%HBN observa-se uma força de aproximadamente 176 % superior, o que indicaria que a liga de 0,20%HBN apresenta um resultado satisfatório para a força de avanço.

Fato inesperado ocorreu com a liga de composição original, pois acreditava-se que ela deveria apresentar uma variação maior, ou até mesmo uma força média ao final do lote superior à todas as outras amostras. Isso mostra que a adição de HBN na composição não manteve um comportamento normal como ocorrido nos resultados obtidos pela força de corte, pois apartir de 0,15% houve uma redução brusca nos seus valores, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Média dos dados de força de avanço em N.

Peça	0,05%HBN	0,10%HBN	0,15%HBN	0,20%HBN	original
1	16,34	13,89	12,49	13,41	15,45
20	27,53	26,44	20,32	20,10	21,59
40	37,73	34,68	25,26	20,84	27,71
60	47,29	44,37	25,13	17,16	36,18
80	53,44	54,57	27,45	18,12	37,23
100	58,14	64,67	31,23	21,09	42,34
120	65,24	69,17	35,80	23,63	44,11

Fonte: Autor



5.1.3 Força passiva

A liga com teor de 0,20%HBN apresenta para as médias de força passiva os menores valores ao final do lote de 120 peças, conforme Tabela 8.

As ligas com adição de 0,10%HBN e 0,05%HBN apresentam a maior variação das médias da força passiva ao final do lote de 120 peças. Na liga com 0,05 % há um aumento de aproximadamente 320 %, já na liga com 0,10%HBN o aumento é ainda maior, chegando a 420 % ao final do lote em relação à liga 0,20%HBN.

Observa-se pelos dados da Tabela 8 e Gráfico 4 que a liga com adição de 0,20%HBN apresenta os menores valores de força, apresentando novamente resultado satisfatório.

Ao comparar as ligas com adição de 0,10%HBN e 0,20%HBN nota-se que há uma redução na força passiva de aproximadamente 73 %, o que mostra que há a redução na força passiva com adição de HBN em níveis superiores a 0,15%.

Tabela 8 - Média dos dados de força passiva em N.

Peça	0,05%HBN	0,10%HBN	0,15%HBN	0,20%HBN	original
1	25,69	22,49	21,30	22,69	22,22
20	40,34	41,70	30,76	30,61	39,45
40	61,10	53,17	29,25	27,86	51,31
60	71,07	69,88	34,56	25,08	63,30
80	82,57	86,91	37,39	27,64	67,19
100	91,44	98,63	42,78	26,79	74,69
120	107,99	116,79	58,06	32,39	82,65

Fonte: Autor

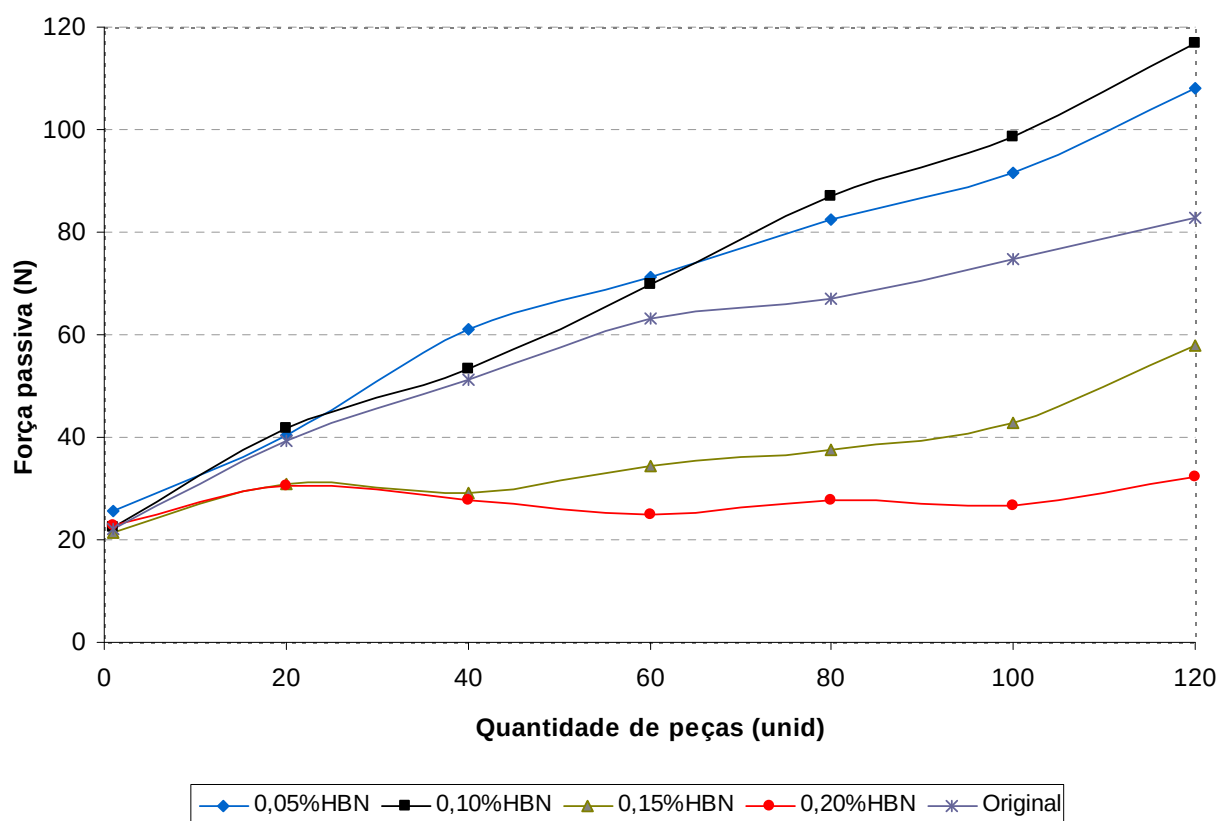


Gráfico 4 - Média dos dados de força passiva

Fonte: Autor

5.2 PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

A pressão específica de corte (K_s) pode ser calculada em função da F_c obtida nos ensaios. Através dos dados de F_c e pela equação 4 pode-se calcular e acompanhar a evolução de K_s ao longo dos ensaios. Mostra-se pela Tabela 9 os dados de K_s calculados e com base nestes dados plotou-se o Gráfico 5.

Tabela 9 - pressão específica de corte pelas médias de F_c em (N/mm^2).

Peça	0,05%HBN	0,10%HBN	0,15%HBN	0,20%HBN	original
1	1787,22	1856,18	1596,25	1642,19	1946,51
20	2015,71	2020,47	1709,22	1818,16	2083,45
40	2020,28	2040,84	1748,66	1715,73	2121,15
60	2199,59	2090,75	1881,67	1735,88	2264,73
80	2260,34	2254,55	1847,34	1782,64	2316,74
100	2489,58	2370,14	1896,44	1690,95	2492,71
120	2596,36	2453,88	2011,26	1868,17	2620,32

Fonte: Autor

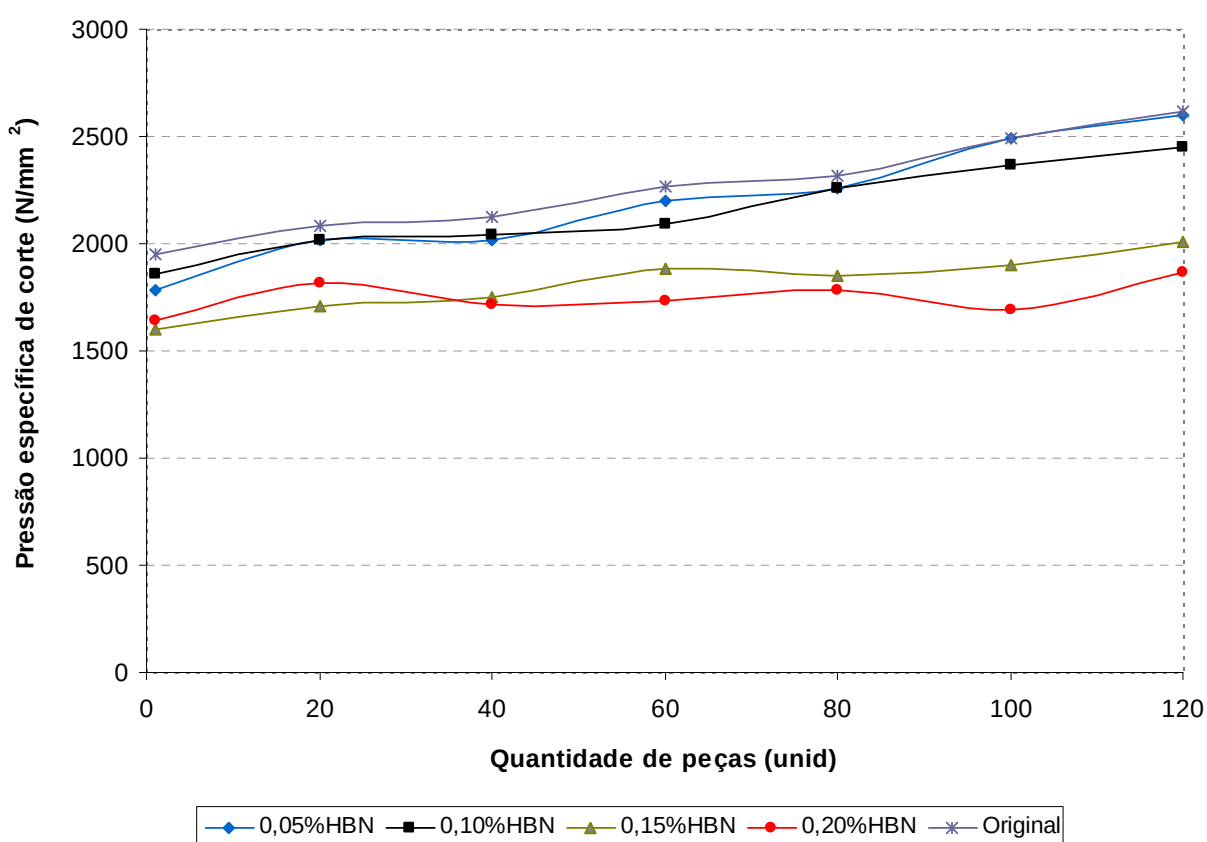


Gráfico 5 - pressão específica de corte.

Fonte: Autor

5.3 MEDIÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO

Mediu-se o desgaste máximo de flanco VB_{Bmax} em todas as amostras a fim de obter dados que fossem capazes de comparar as amostras. Acompanhou-se, portanto, a evolução do desgaste ao longo de 120 peças por lote. Tem-se a Figura 62 e a Figura 63 que mostram a evolução do desgaste.

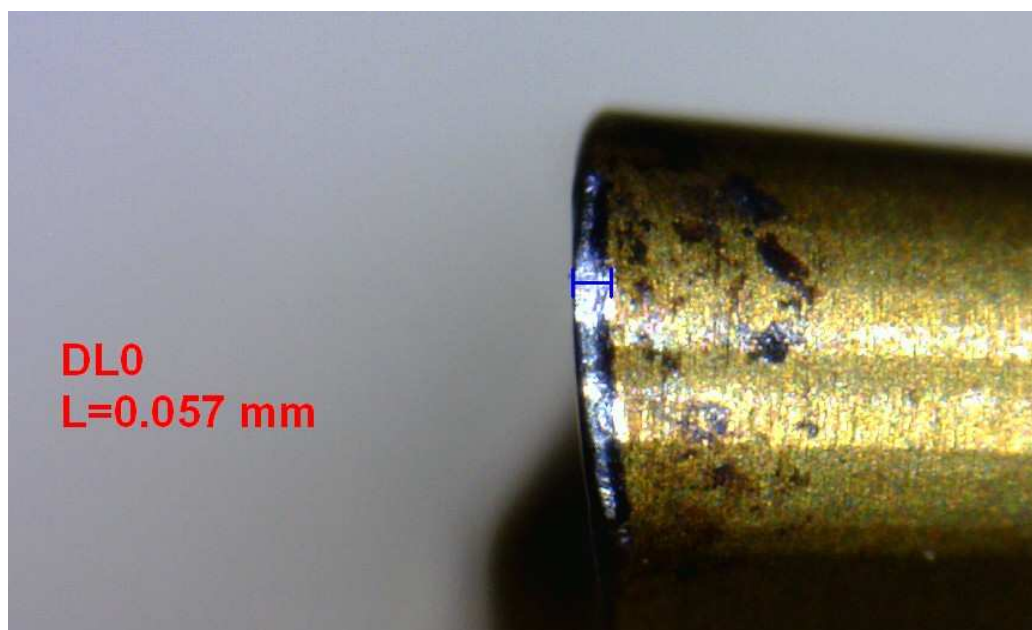


Figura 62 - Desgaste em liga 0,05%HBN, lote 01 com 20 peças usinadas (Zoom 82x).
Fonte: Autor

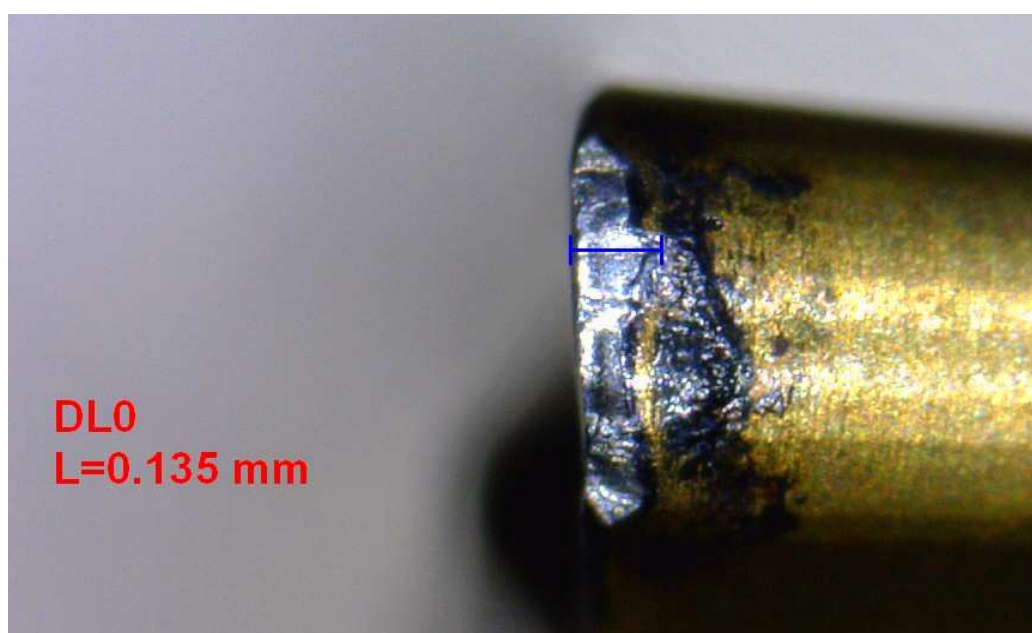


Figura 63 - Desgaste em liga 0,05%HBN, lote 01 com 120 peças usinadas (Zoom 82x).
Fonte: Autor

Através da medição dos desgastes VB_{Bmax} gerou-se uma planilha no Excel® para plotar um gráfico que acompanhasse a evolução do desgaste e mais tarde fosse capaz de comparar os desgastes de todas as amostras, através da média dos 3 lotes de cada composição.

Os dados da Tabela 10 mostram que há a tendência em todas as amostras do valor do desgaste aumentar ao longo do ensaio, nunca mantendo-se constante ou com sua curva em decréscimo.

Observa-se também pelos dados da Tabela 10 que a medida que o teor de HBN aumenta há a tendência do desgaste de flanco $VB_B\max$ aumentar, porém, na liga com adição de 0,20%HBN essa teoria não se concretizou fazendo com que o desgaste fosse menor apenas que a liga original.

A liga original apresenta-se como o melhor resultado de desgaste de ferramenta ao final do lote de 120 peças e também quando comparado às outras amostras, conforme Gráfico 6. Ao compararmos com a liga com 0,15%HBN observa-se uma diferença de aproximadamente 12% menor.

Para a questão do desgaste de ferramenta, recomenda-se ainda a utilização da liga original, podendo ser substituída com êxito pela liga com adição de 0,20%HBN, conforme observa-se pelos dados da Tabela 10 e Gráfico 6.

Tabela 10 - Média do desgaste $VB_B\max$ das amostras, em mm.

Peça	0,05%HBN	0,10%HBN	0,15%HBN	0,20%HBN	original
20	0,048	0,052	0,055	0,047	0,043
40	0,063	0,075	0,070	0,063	0,054
60	0,091	0,082	0,087	0,080	0,061
80	0,103	0,095	0,113	0,090	0,077
100	0,120	0,115	0,130	0,105	0,088
120	0,126	0,128	0,139	0,122	0,119

Fonte: Autor

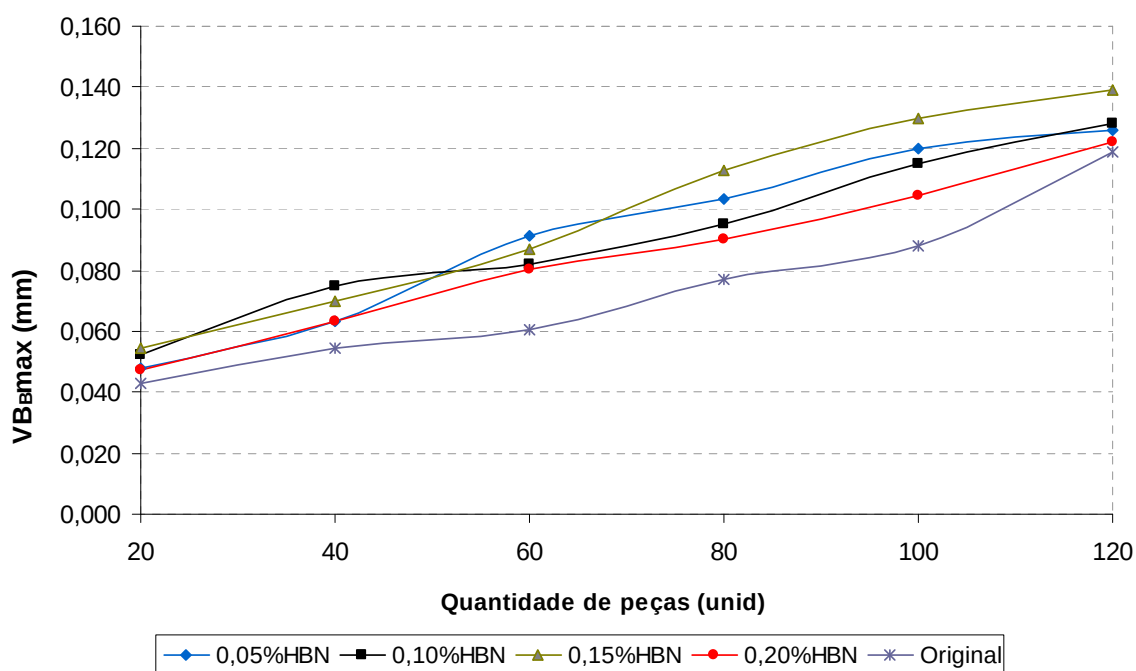


Gráfico 6 - Média dos valores de $VB_B\max$ das amostras.

Fonte: Autor

5.4 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE Ra

Através da medição realizada da rugosidade Ra gerou-se uma planilha no Excel®, Tabela 11, também plotou-se o Gráfico 7 que mostra a evolução da rugosidade ao longo do ensaio de cada amostra. Os dados das medições por lote estão no anexo 5 deste trabalho.

Tabela 11 - Valores médios de Ra em μm .

Peça	0,05%HBN	0,10%HBN	0,15%HBN	0,20%HBN	original
1	0,924	0,997	1,078	1,022	0,724
20	0,949	0,944	1,124	1,062	0,651
40	1,278	1,309	1,249	1,207	0,680
60	1,298	1,378	1,169	1,239	0,830
80	1,243	1,512	1,259	1,323	0,774
100	1,307	1,679	1,338	1,413	0,784
120	1,331	1,912	1,268	1,556	0,936

Fonte: Autor

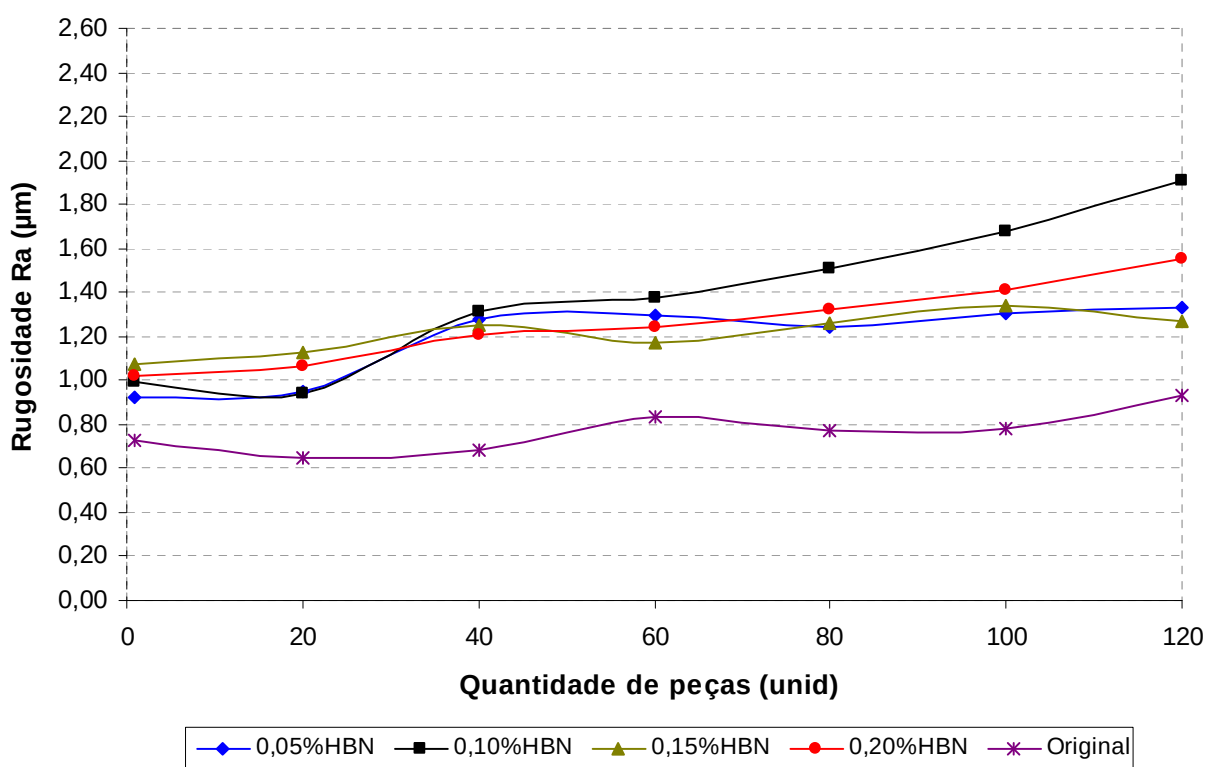


Gráfico 7 - Média dos valores de Ra.

Fonte: Autor

Com relação as ligas usinadas observou-se elevação da rugosidade em relação ao acréscimo do teor de HBN. Observa-se pelo Gráfico 7 que a liga original

apresentou os melhores resultados quanto à rugosidade Ra da superfície, além de apresentar visualmente aspecto superficial de boa qualidade em todo o lote usinado.

Esse aspecto da superfície quando comparada com as outras ligas, verificou que a adição de HBN proporcionou uma piora na aparência visual.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os dados das componentes da força de Usinagem obtidos nos ensaios após a usinagem dos 3 lotes de 120 peças de cada amostra, totalizando 1800 peças, mostram que a liga 0,20%HBN apresentou menores valores para as componentes, F_c , F_f e F_p , conforme Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4 citados no item 5.1 deste trabalho.

A pressão específica de corte (K_s), item 5.2, aumenta com o número de peças usinadas, porém tende a diminuir pela adição do teor de HBN na amostra, conforme Gráfico 5.

Quanto ao desgaste máximo de flanco VB_{Bmax} , item 5.3, a liga que apresentou melhor resultado foi a original, sendo que a liga 0,20%HBN, apresentou segundo melhor resultado, sendo essa diferença muito próxima, em torno de 2,5%.

Segundo medições de dureza realizadas, Gráfico 1 e Tabela 5, observou-se a redução da dureza das amostras, com o aumento do teor de HBN. Esta redução da dureza pode ser um dos fatores que influenciaram na redução das componentes da força de usinagem e que esta não influenciou em desgaste da ferramenta.

Em relação a rugosidade verificou-se que com o acréscimo do teor de HBN houve elevação dos valores de R_a e que a liga original apresentou os melhores resultados.

Quanto ao aspecto visual da superfície quando comparada com as outras ligas, verificou que a adição de HBN proporcionou uma piora na aparência.

Com base nos resultados não é possível afirmar qual liga apresenta melhores resultados de um modo geral, pois a liga 0,20%HBN apresentou resultados satisfatórios reduzindo a força de usinagem, porém a liga original apresentou resultados satisfatórios quanto ao desgaste VB_{Bmax} e rugosidade R_a . Por isso não indica-se nenhuma decisão a ser tomada, visto que seria necessário a realização de novos ensaios.

Como sugestão para trabalhos futuros seria necessário a realização de testes em motores para verificar se o componente não seria prejudicado em função de sua redução de dureza.

Como a peça é utilizada em processo de alargamento, sugere-se ensaios com relação aos processos de alargamento com as ligas que apresentaram melhores resultados (original e 0,20%HBN).

Realizar ensaios segundo norma ISO 3685:1993 com as ligas original e 0,20% HBN até atingir o desgaste $VB_{Bmax} = 0,60$ mm.

Realizar ensaios destas ligas com variando raio de ponta (r_ϵ) da ferramenta, velocidades de corte (v_c) diferentes e profundidades de corte (a_p) diferentes.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 513:2004. **Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas – Denominação dos grupos principais e grupos de aplicação.** Rio de Janeiro. 2004.

ABNT NBR ISO 4288:2008. **Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.** Rio de Janeiro. 2008.

ABNT NBR NM ISO 6506-1: 2010. **Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell – Parte 1: Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: 2010.

ALLAM, I. M. **Solid lubricants for applications at elevated temperatures.** Journal of materials science 26 (1991) 3977-3984. KFUPM/RI, Dhahran 31261, Saudi Arabia

AMORIM, Heraldo José de. 2002. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramentas de metal duro.** Tese de Mestrado. PROMEC – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BIBLIOTECA UNISINOS. **Guia para elaboração de trabalhos acadêmicos (artigo de periódico, dissertação, projeto, trabalho de conclusão de curso e tese).** São Leopoldo, 2011.

BLACK, J. T. (1994). **Introduction to machining processes.** In: Metals Handbook. Vol. 16: Machining. 9.ed. Washington: ASM International, p.1-4.

BLEISTAHL. Disponível em <<http://www.bleistahl.com.br/>>. Acesso em 07/05/2011.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do Pó: técnica e produtos.** São Paulo Associação Brasileira de Metais, 2001.

COMBUSTOL. Disponível em <<http://www.combustol.com.br/conteudo.php?cod=54>>. Acessado em 25/04/2011.

DELFORGE, Daniel Yvan Martin; FERREIRA, Itamar; ROCHA DA SILVA, Cesar Garcia; PARIS, Eduardo Antonio Geris; LUIS MARCELO, André; NOVAES, Rafael Henrique. 2007. **Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?** (Metalurgia do Pó) REM – Revista Escola de Minas.

DIN 6584. **Terms of the cutting technique; forces, energy, work, power.** Berlim, 1980

DIAS, Arão de Matos. **Aço Sinterizado e Infiltrado com Cobre para Alta Resistência ao Impacto.** Tecsinter Metalurgia Ltda. Canoas - RS - Brasil . Disponível em: <<http://www.tecsinter.com.br/pesquisa>>. Acesso em: 17/03/2011.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. 2000. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiber Editora, São Paulo

FERRARESI, Dino. 1970. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Editora Edgard Blucher. São Paulo

GERMAN, R.M. **Powder metallurgy science**, Princeton, NJ: MPIF, 2nd edition, 1984.

GRUPO SETORIAL DE METALÚRGIA DO PÓ. A **Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, 1ª ed., São Paulo 2009 .

ISO 3685:1993: **Tool-life testing with single-point turning tools**. 2.ed. Geneva, 1993. 48p.

JESUS FILHO, Edson Souza de. 2006. **Processamento, Usinagem, e desgaste de ligas sinterizadas para aplicações automotivas**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - USP

KALPAKJIAN, S. (1995). **Manufacturing engineering and technology**. 3.ed., Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1296p.

KISTLER Instrumente AG. **Charge amplifier with galvo output - type 5006**: operating- and service instructions . Winterthur: Kistler, 1979.

KÖNIG, W., KLOCKE, F. (1997). **Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren**. 5.ed., Berlin: Springer-Verlag, 417p.

KURATLE, R. H.; SIGNER, A. **The Basic of Piezoelectric Measurement Technology**. Winterthur: Kistler, 1999.

LACERDA, Helder Barbieri; SIQUEIRA, Ildeu Lucio; PIACESI, Roberto Araújo; JUNIOR, Walter Seppe; OLIVEIRA, Flavio Adriano Santos de. 2007. **Estudo da usinagem de guias de válvulas de um motor de combustão interna**. 17º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica

MACHADO, Alisson; SILVA, Marcio Bacci da. 1999. **“Usinagem dos metais”**, Apostila DEEME – UFU, Uberlândia

METALURGIA DO PÓ – **Mercado & design & comparação com processos concorrentes** – Mini Curso, Módulo 2. Marco Pallini, International Conference on Powder Technology – PTECH-2005, Salvador-Brasil, Outubro/2005.

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em <<http://www.ni.com/solutions/>>. Acesso em 24/05/2011.

SALGADO, L; AMBROZIO FILHO, F; LEAL NETO, R. M.; COLOSIO, M. A.; HERRMANN FILHO, C. R.; ROSSI, J. L. **P/M high speed steels for valve seat insert application**. SAE TRANSACTIONS: Journal of materials and manufacturing, v. 110, p261-264, 2001.

SANDVIK. **Ferramentas de corte da Sandvik Coromant : Catálogo principal: torneamento, fresamento, furação, mandrilamento, sistemas de fixação.** Suécia. 2009

SANTOS, Rodrigo Gonçalves dos. 2004. **Avaliação do processo de alargamento de guias de válvulas.** Tese de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR.

SECO TOOLS. **Turning Tools.** Suécia. 2009.

SIQUEIRA, Ildeu Lucio; LACERDA, Helder Barbieri; PIACESI, Roberto Araújo; JUNIOR, Walter Seppe; OLIVEIRA, Flavio Adriano Santos de. 2007. **Estudo da usinagem das sedes de válvulas de admissão de motores de combustão interna.** 17º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I.** 6ª edição – Florianópolis: Editora da UFSC, 2005

SOUZA, André João de. 2004. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

TELECURSO 2000. **Metrologia.** Fundação Roberto Marinho.

ANEXO 1

Composição química da liga original.

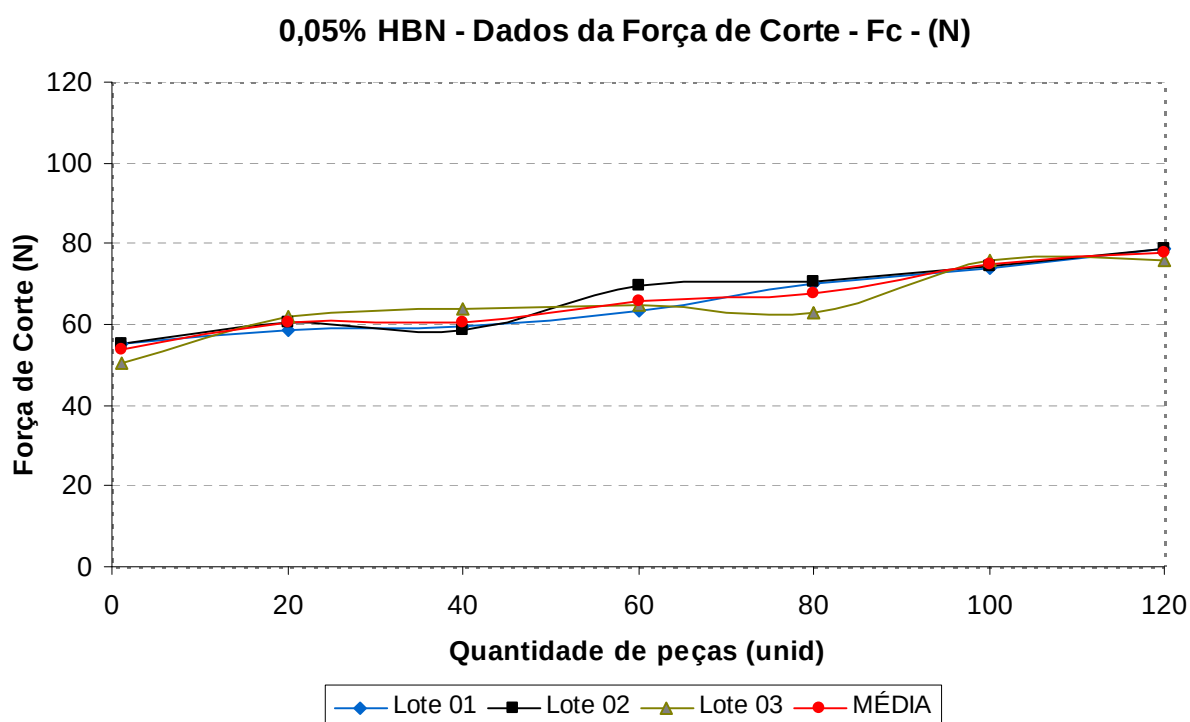
APPLICATION		VALVE GUIDE	
CHEMICAL CHARACTERISTICS		PHYSICAL CHARACTERISTICS	
C	0,20 - 0,50 %	DENSITY	
Mo	1,00 - 2,00%	$> 6,4 \text{ g/cm}^3$	
Cr	2,50 - 3,50%	HARDNESS	
S	0,25 - 0,75%	60 - 100 HRb (1/16" - 100 kgf)	
Fe	BALANCE	150 - 250 HB (2,5 mm - 62,5 kgf)	
Other Elements	< 2%		
OIL CONTENT:			
$> 0,7$			

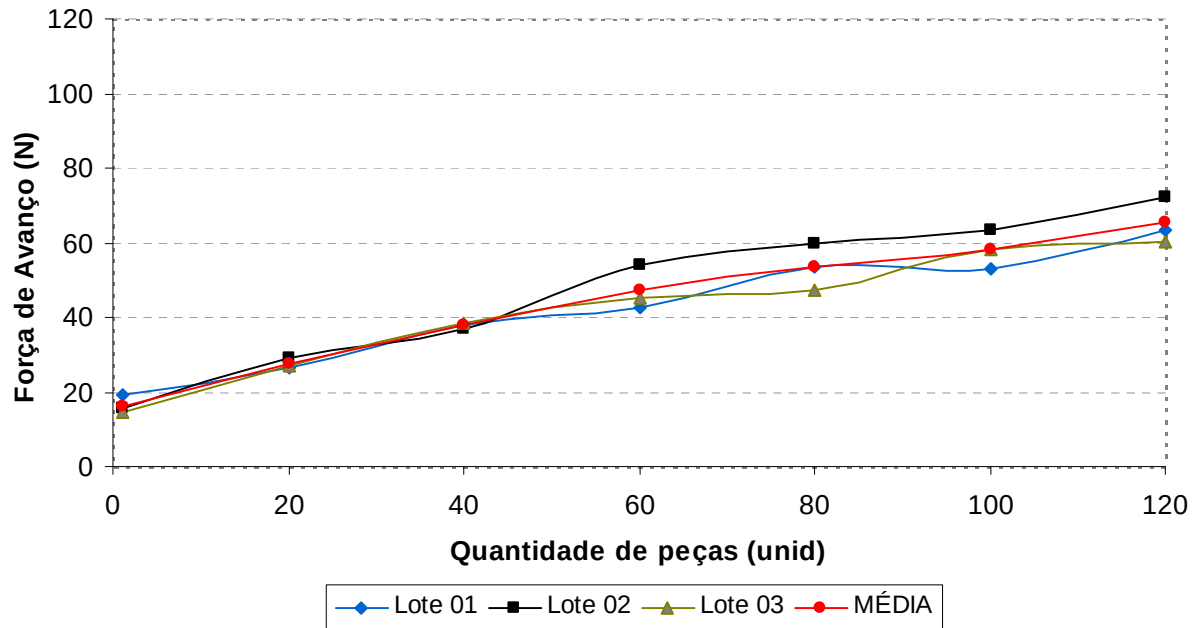
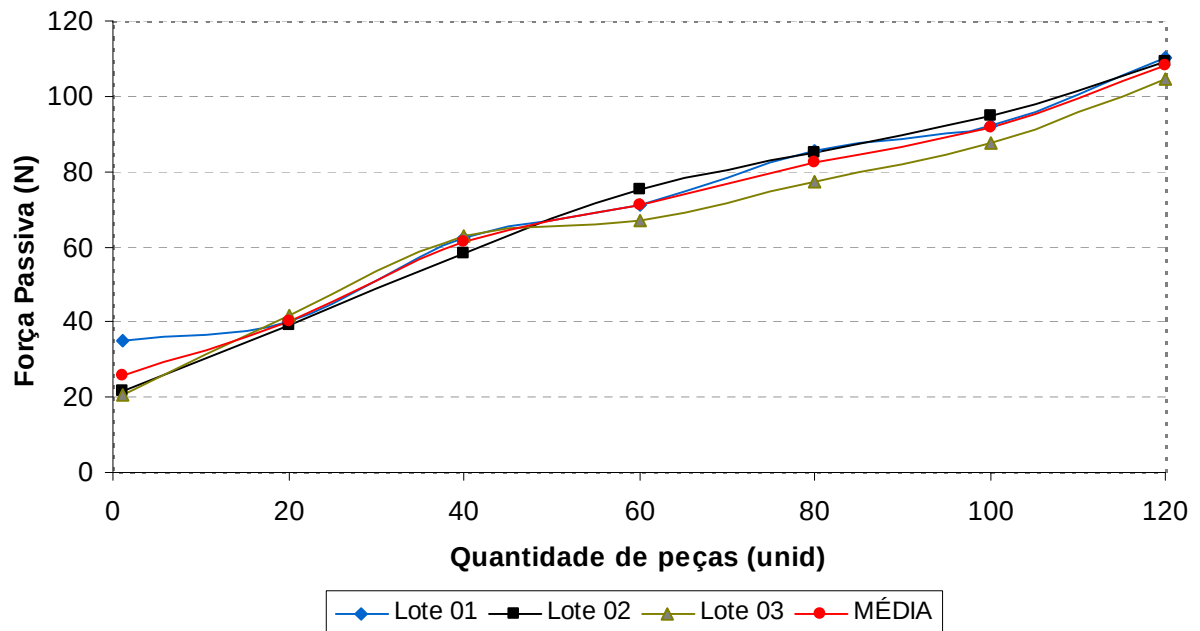


ANEXO 3

Dados das forças por lote e a média, bem como os gráficos plotados de F_c , F_f e F_p da liga 0,05%HBN.

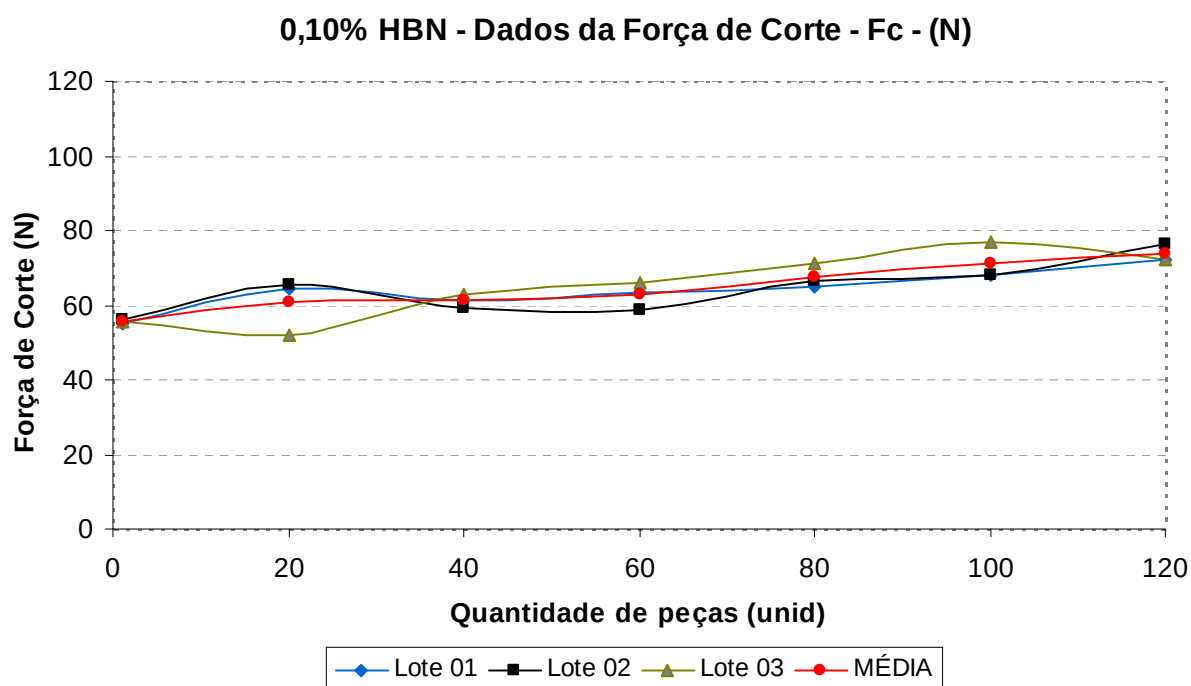
Peça	Lote 01			Lote 02			Lote 03			Média 0,05%HBN		
	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p
1	55,33	19,04	35,11	55,07	15,45	21,41	50,45	14,52	20,55	53,62	16,34	25,69
20	58,60	26,56	40,37	60,70	29,18	38,93	62,12	26,84	41,73	60,47	27,53	40,34
40	59,48	38,00	62,16	58,58	36,79	58,30	63,77	38,39	62,85	60,61	37,73	61,10
60	63,35	42,74	70,96	69,64	54,12	75,12	64,98	45,01	67,12	65,99	47,29	71,07
80	70,12	53,31	85,54	70,53	59,65	84,76	62,78	47,36	77,40	67,81	53,44	82,57
100	73,69	52,92	92,04	74,63	63,56	94,55	75,74	57,95	87,73	74,69	58,14	91,44
120	78,85	63,58	110,13	78,86	72,07	109,43	75,97	60,07	104,40	77,89	65,24	107,99

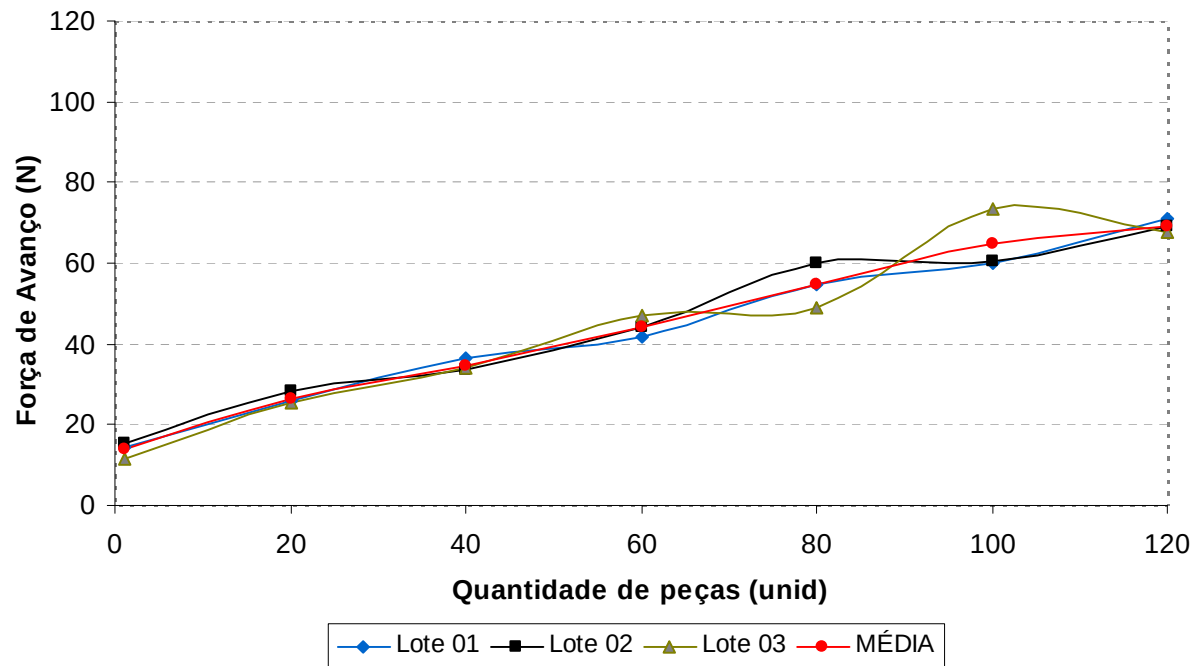
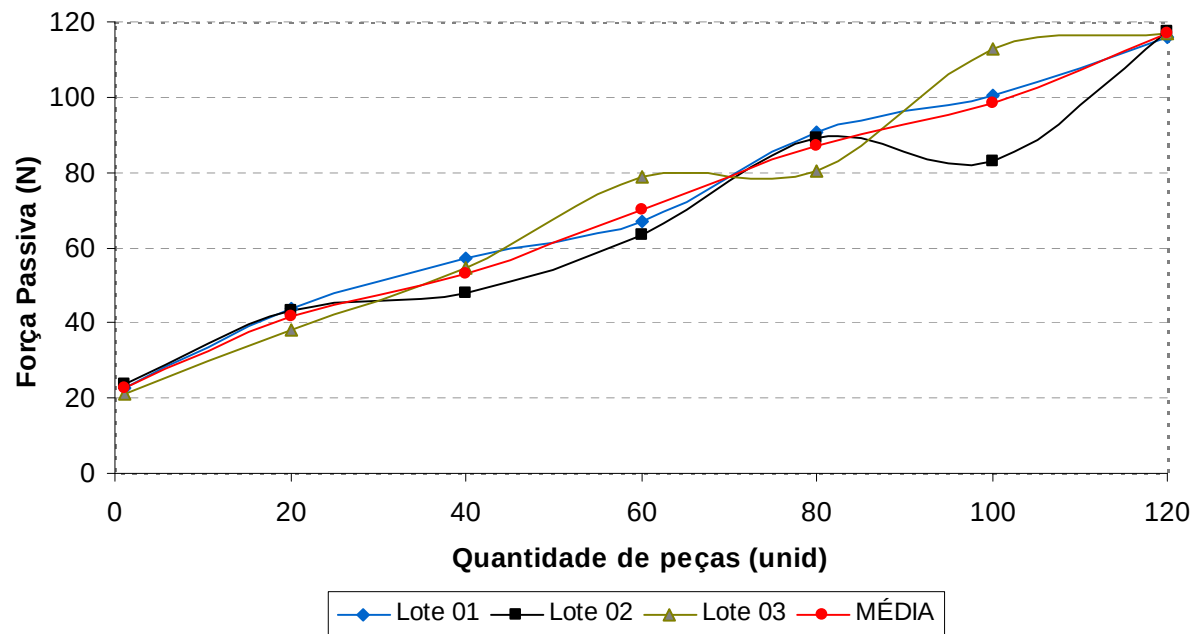


0,05% HBN - Dados da Força de Avanço - F_f - (N)**0,05% HBN - Dados da Força Passiva - F_p - (N)**

Dados das forças por lote e a média, bem como os gráficos plotados de F_c , F_f e F_p da liga 0,10%HBN.

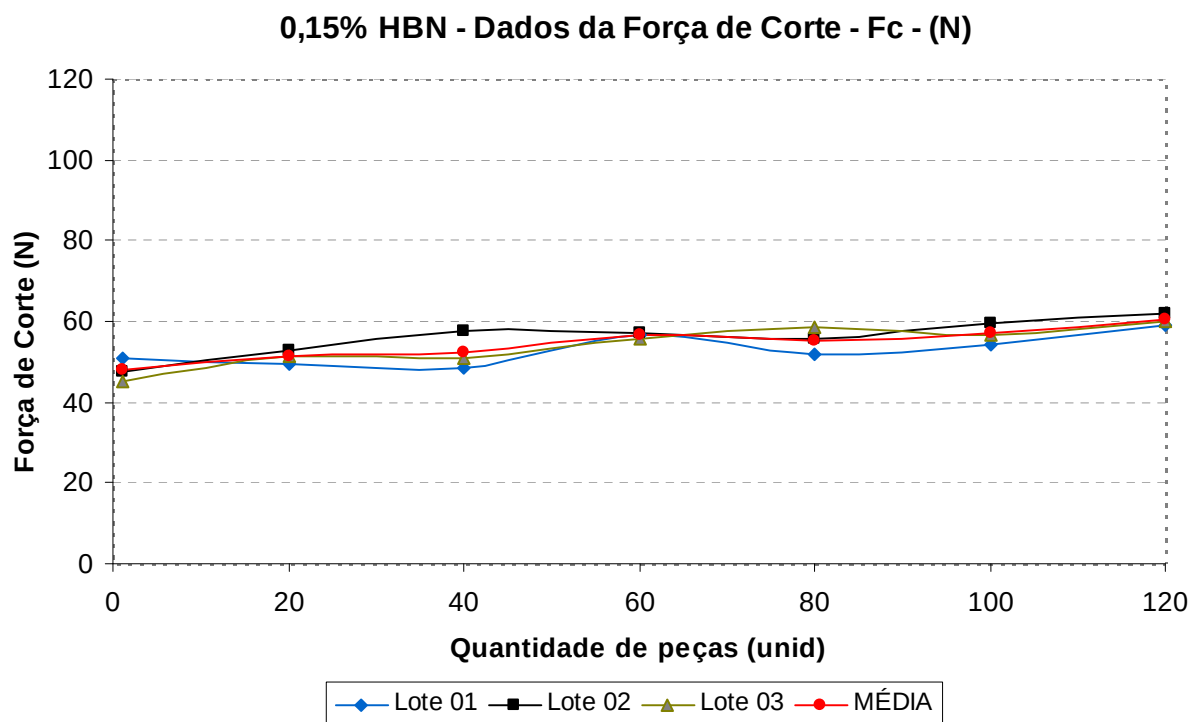
Peça	Lote 01			Lote 02			Lote 03			Média 0,10%HBN		
	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p
1	55,06	14,42	22,67	56,33	15,55	23,52	55,66	11,70	21,27	55,69	13,89	22,49
20	64,30	25,98	43,90	65,42	28,09	43,26	52,12	25,25	37,94	60,61	26,44	41,70
40	61,50	36,67	57,15	59,31	33,40	47,67	62,87	33,97	54,69	61,23	34,68	53,17
60	63,29	41,59	67,16	58,71	44,29	63,56	66,17	47,23	78,91	62,72	44,37	69,88
80	65,15	54,55	90,83	66,54	60,16	89,30	71,22	49,00	80,59	67,64	54,57	86,91
100	68,20	60,12	100,27	68,08	60,28	82,78	77,03	73,63	112,83	71,10	64,67	98,63
120	72,08	70,87	116,03	76,50	69,08	117,55	72,27	67,55	116,78	73,62	69,17	116,79

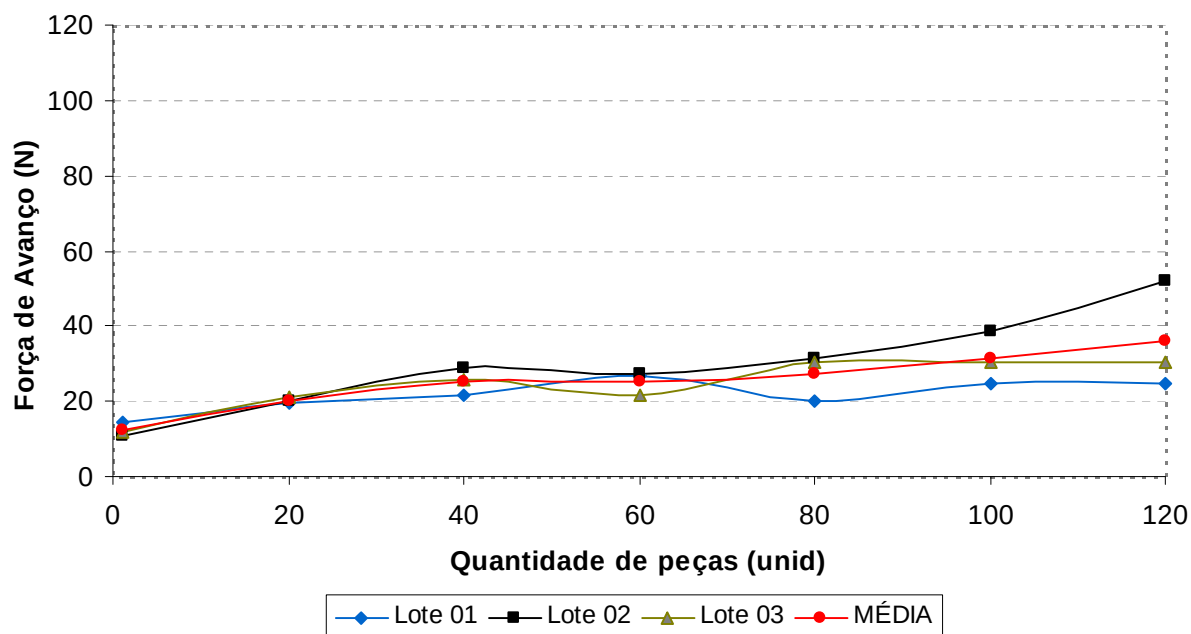
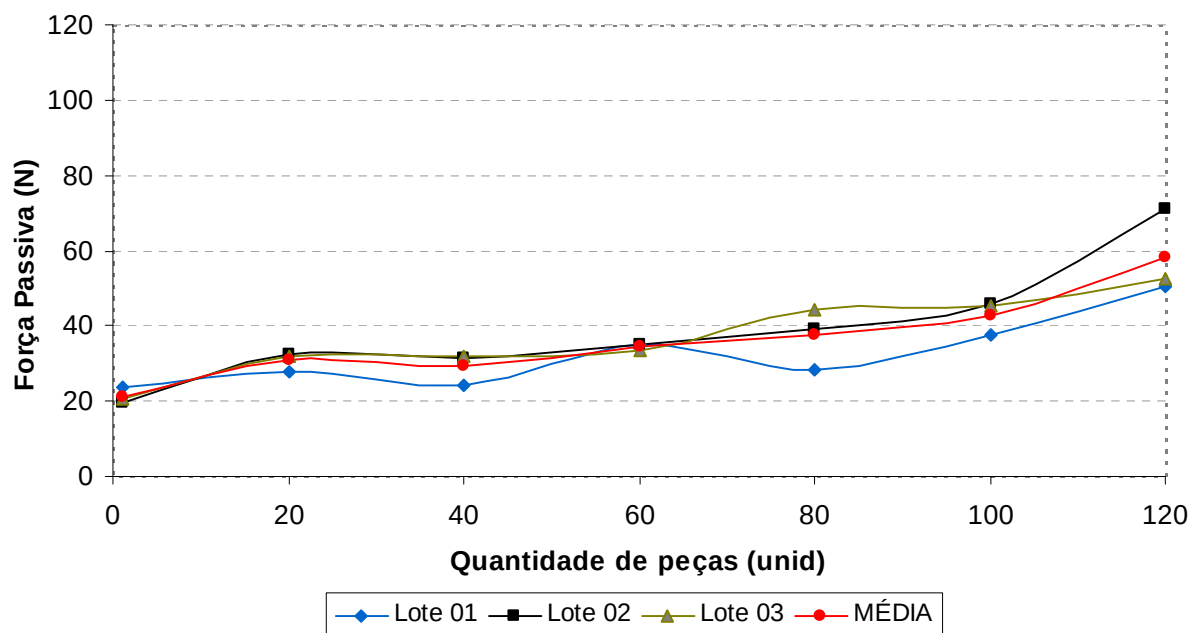


0,10% HBN - Dados da Força de Avanço - F_f - (N)**0,10% HBN - Dados da Força Passiva - F_p - (N)**

Dados das forças por lote e a média, bem como os gráficos plotados de F_c , F_f e F_p da liga 0,15%HBN

Peça	Lote 01			Lote 02			Lote 03			Média 0,15%HBN		
	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p
1	50,94	14,66	23,73	47,69	10,77	19,56	45,03	12,04	20,60	47,89	12,49	21,30
20	49,66	19,67	27,98	52,73	19,95	32,38	51,44	21,34	31,90	51,28	20,32	30,76
40	48,62	21,56	24,39	57,82	28,60	31,50	50,93	25,61	31,84	52,46	25,26	29,25
60	56,52	26,56	35,14	57,21	27,41	35,05	55,62	21,41	33,49	56,45	25,13	34,56
80	51,61	20,34	28,53	55,89	31,50	39,37	58,76	30,53	44,26	55,42	27,45	37,39
100	54,26	24,71	37,36	59,67	38,54	45,71	56,75	30,44	45,26	56,89	31,23	42,78
120	59,15	24,71	50,67	62,04	52,24	71,00	59,82	30,44	52,52	60,34	35,80	58,06

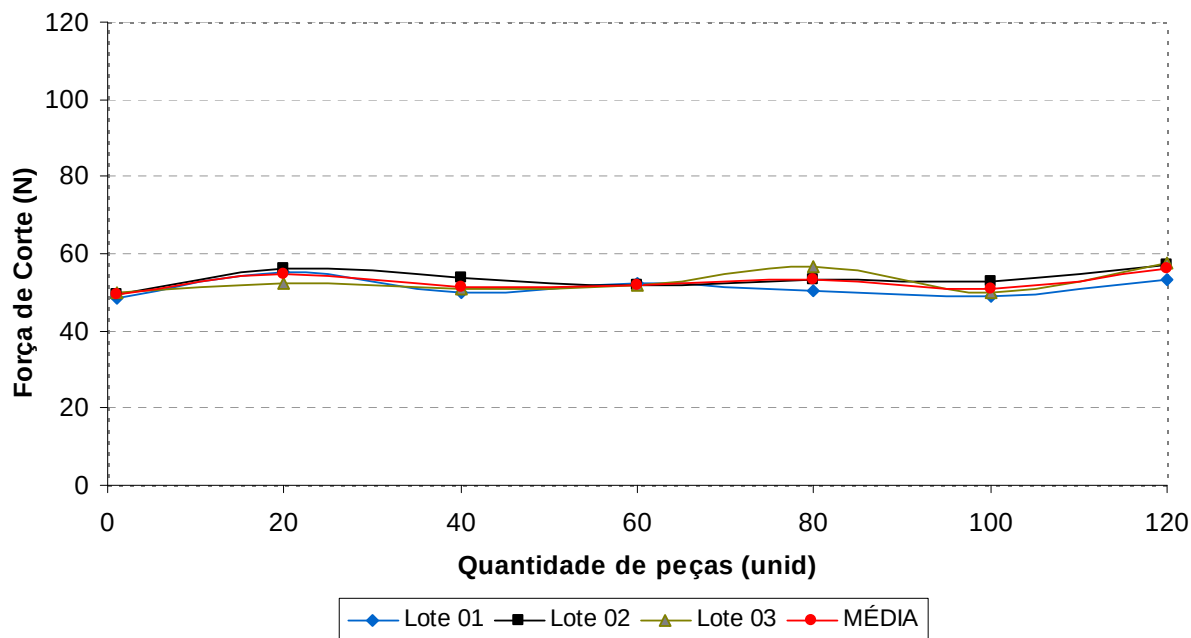


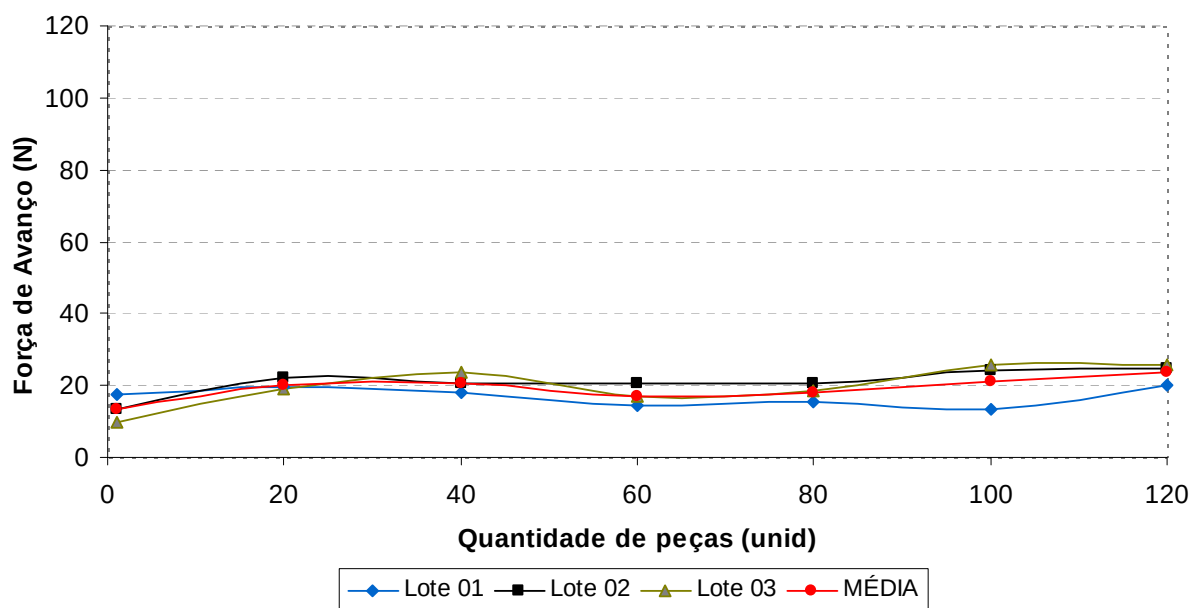
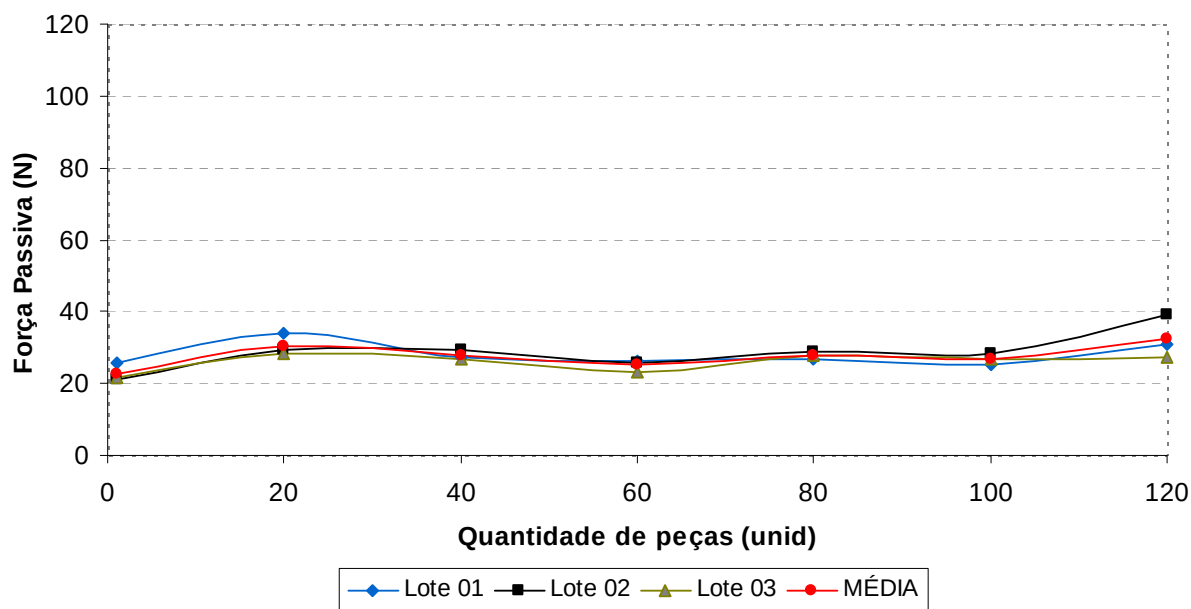
0,15% HBN - Dados da Força de Avanço - F_f - (N)**0,15% HBN - Dados da Força Passiva - F_p - (N)**

Dados das forças por lote e a média, bem como os gráficos plotados de F_c , F_f e F_p da liga 0,20%HBN

Peça	Lote 01			Lote 02			Lote 03			Média 0,20%HBN		
	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p
1	48,30	17,48	25,53	49,34	13,22	21,02	50,16	9,55	21,51	49,27	13,41	22,69
20	55,44	19,55	34,05	56,00	21,91	29,48	52,20	18,83	28,30	54,54	20,10	30,61
40	49,83	17,87	27,55	53,95	20,77	29,25	50,64	23,87	26,79	51,47	20,84	27,86
60	52,52	14,18	26,22	51,88	20,43	25,76	51,83	16,88	23,25	52,08	17,16	25,08
80	50,50	15,30	26,58	53,14	20,36	28,68	56,80	18,71	27,66	53,48	18,12	27,64
100	49,11	13,15	25,09	52,92	24,44	28,40	50,16	25,70	26,87	50,73	21,09	26,79
120	53,50	20,29	30,82	57,05	24,90	39,29	57,59	25,70	27,07	56,05	23,63	32,39

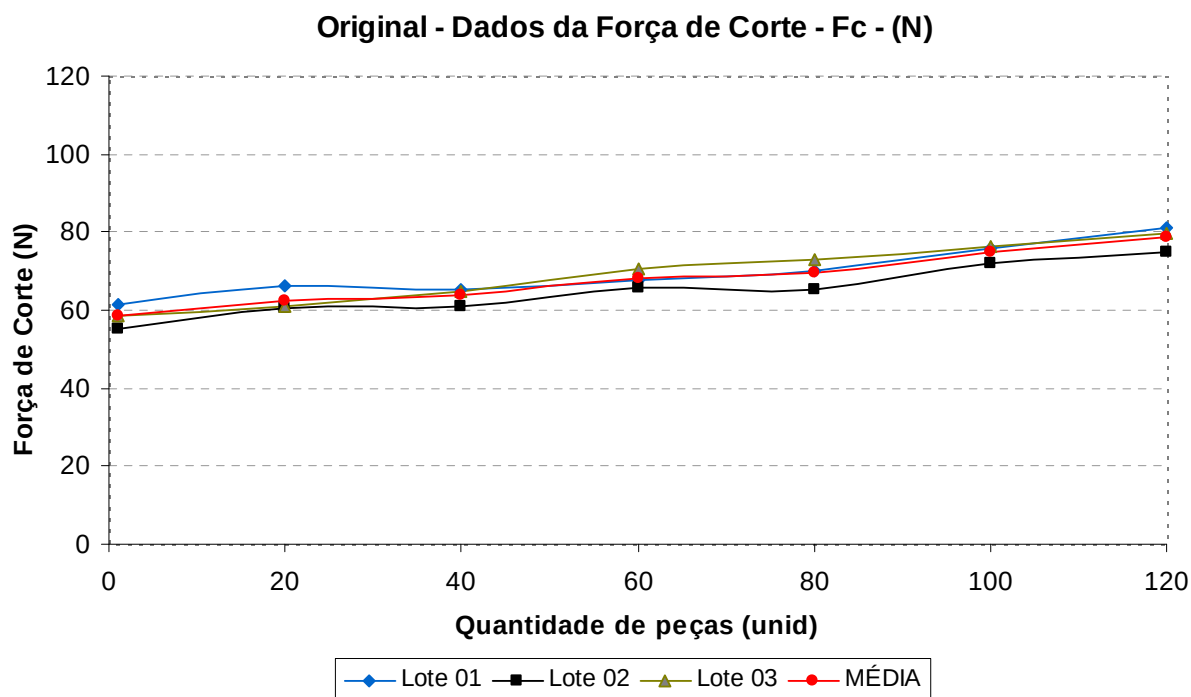
0,20% HBN - Dados da Força de Corte - F_c - (N)

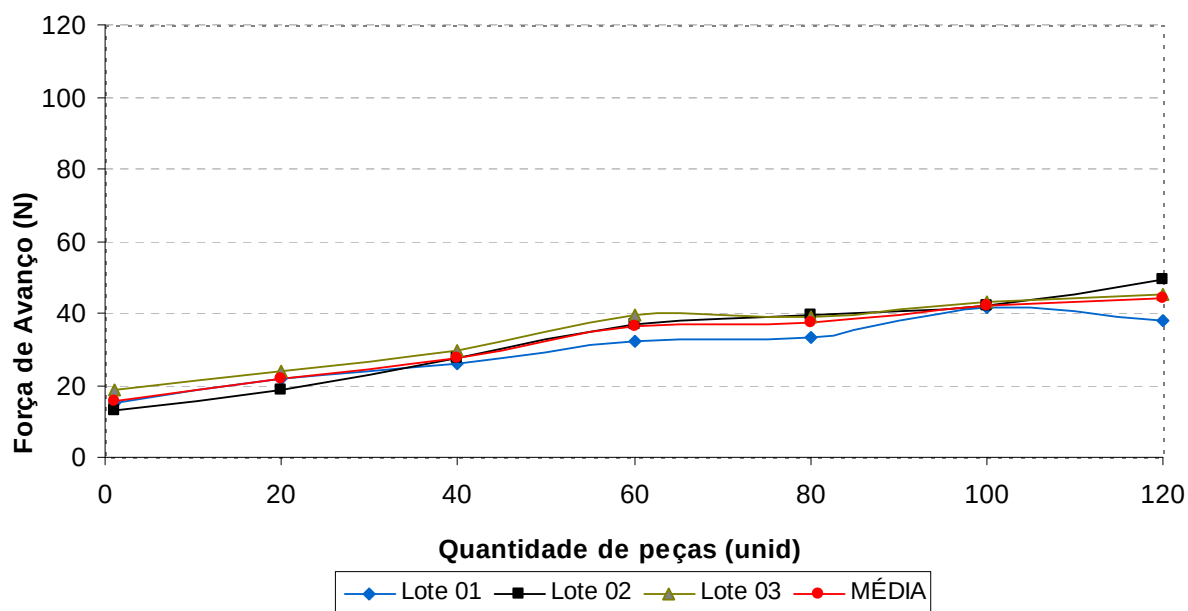
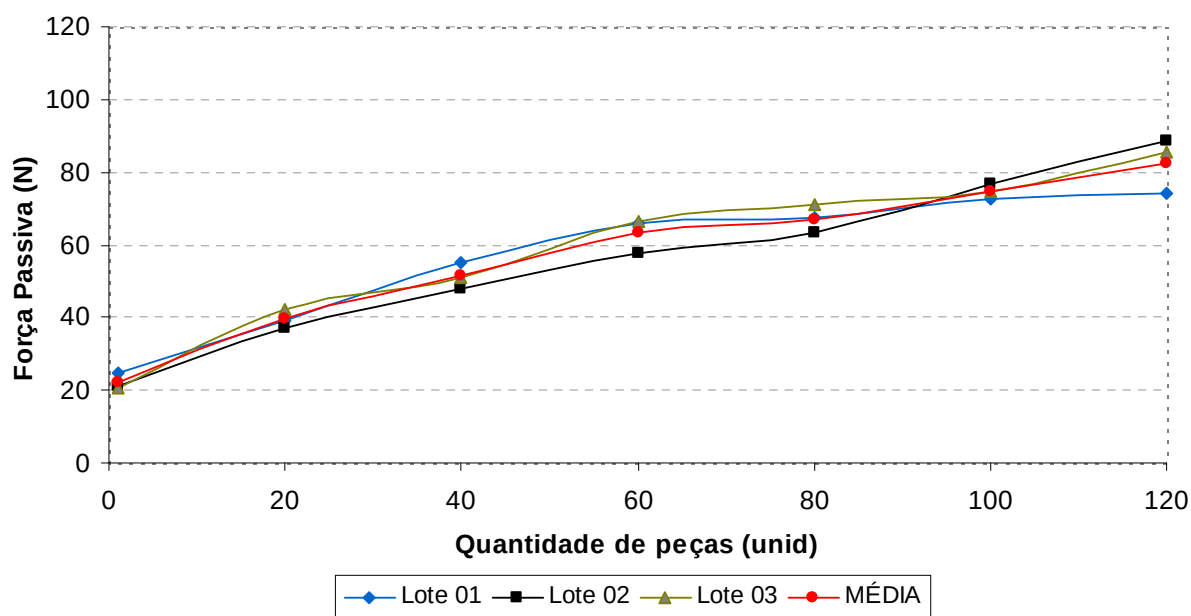


0,20% HBN - Dados da Força de Avanço - Ff - (N)**0,20% HBN - Dados da Força Passiva - Fp - (N)**

Dados das forças por lote e a média, bem como os gráficos plotados de F_c , F_f e F_p da liga original

Peça	Lote 01			Lote 02			Lote 03			Média original		
	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p
1	61,63	15,00	24,82	55,12	12,78	21,25	58,44	18,57	20,60	58,40	15,45	22,22
20	66,20	22,06	39,35	60,47	18,62	36,95	60,84	24,10	42,05	62,50	21,59	39,45
40	65,21	25,78	55,03	60,96	27,53	47,92	64,73	29,82	50,96	63,63	27,71	51,31
60	67,65	32,25	65,95	65,74	36,99	57,68	70,44	39,30	66,28	67,94	36,18	63,30
80	70,26	33,48	67,33	65,38	39,44	63,23	72,87	38,78	71,02	69,50	37,23	67,19
100	76,07	41,46	72,81	71,96	42,30	76,49	76,31	43,25	74,76	74,78	42,34	74,69
120	81,07	38,09	74,25	74,99	49,10	88,37	79,77	45,13	85,33	78,61	44,11	82,65

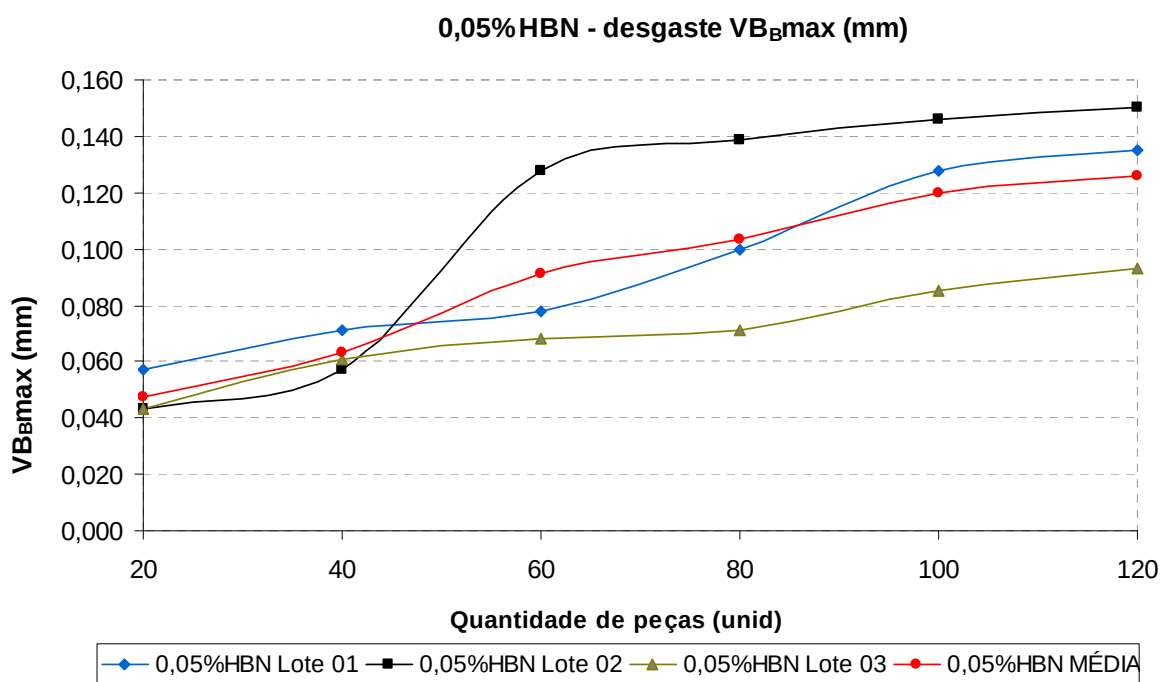


Original - Dados da Força de Avanço - F_f - (N)Original - Dados da Força Passiva - F_p - (N)

ANEXO 4

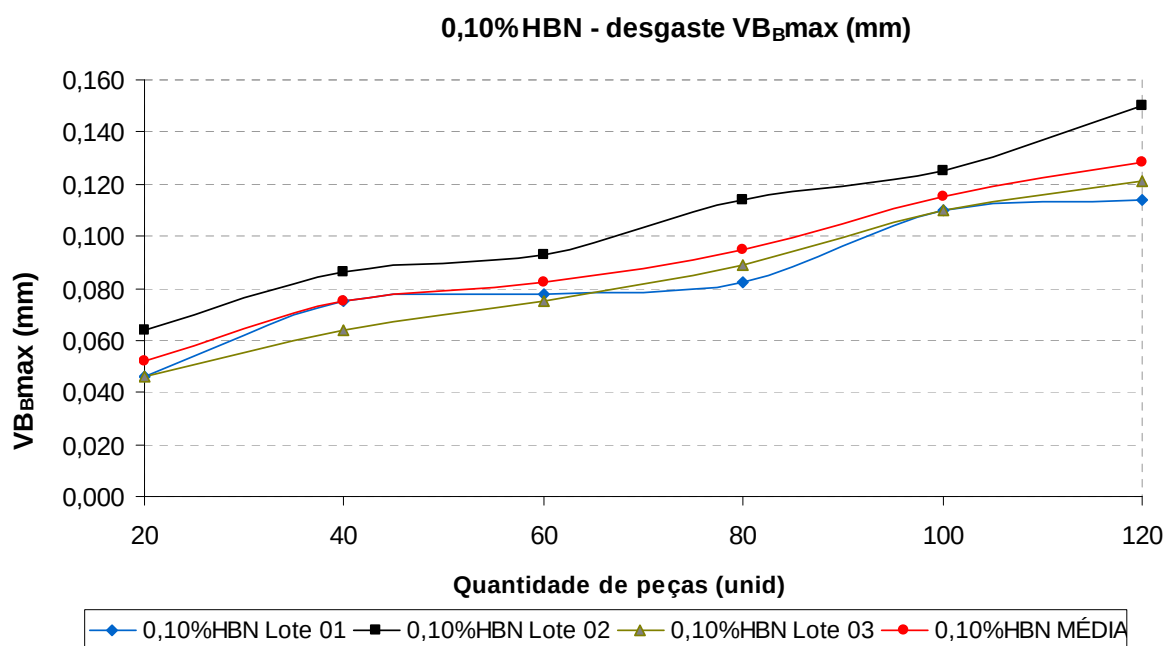
Dados de desgaste das ferramentas.por lote e a média, bem como o gráfico plotado da liga 0,05%HBN.

Peças	Lote 01 VB _B max (mm)	Lote 02 VB _B max (mm)	Lote 03 VB _B max (mm)	Média VB _B max (mm)
20	0,057	0,043	0,043	0,048
40	0,071	0,057	0,061	0,063
60	0,078	0,128	0,068	0,091
80	0,100	0,139	0,071	0,103
100	0,128	0,146	0,085	0,120
120	0,135	0,150	0,093	0,126



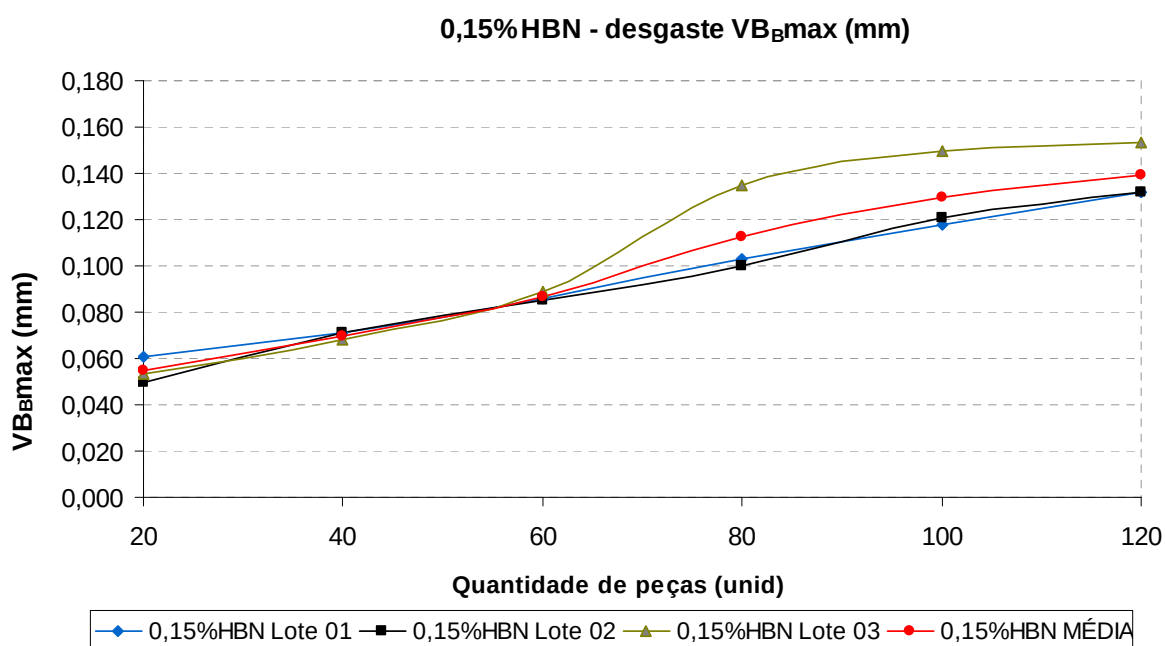
Dados de desgaste das ferramentas.por lote e a média, bem como o gráfico plotado da liga 0,10%HBN.

Peças	Lote 01 VB _B max (mm)	Lote 02 VB _B max (mm)	Lote 03 VB _B max (mm)	Média VB _B max (mm)
20	0,046	0,064	0,046	0,052
40	0,075	0,086	0,064	0,075
60	0,078	0,093	0,075	0,082
80	0,082	0,114	0,089	0,095
100	0,110	0,125	0,110	0,115
120	0,114	0,150	0,121	0,128



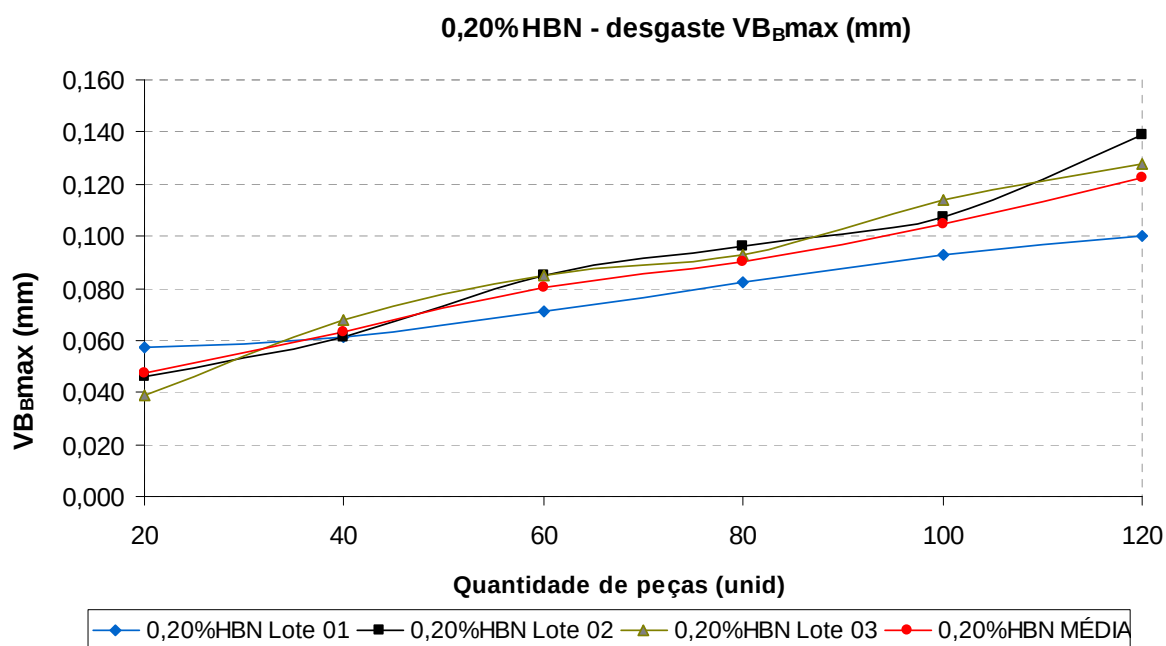
Dados de desgaste das ferramentas.por lote e a média, bem como o gráfico plotado da liga 0,15%HBN.

Peças	Lote 01 VB _B max (mm)	Lote 02 VB _B max (mm)	Lote 03 VB _B max (mm)	Média VB _B max (mm)
20	0,061	0,050	0,053	0,055
40	0,071	0,071	0,068	0,070
60	0,086	0,085	0,089	0,087
80	0,103	0,100	0,135	0,113
100	0,118	0,121	0,150	0,130
120	0,132	0,132	0,153	0,139



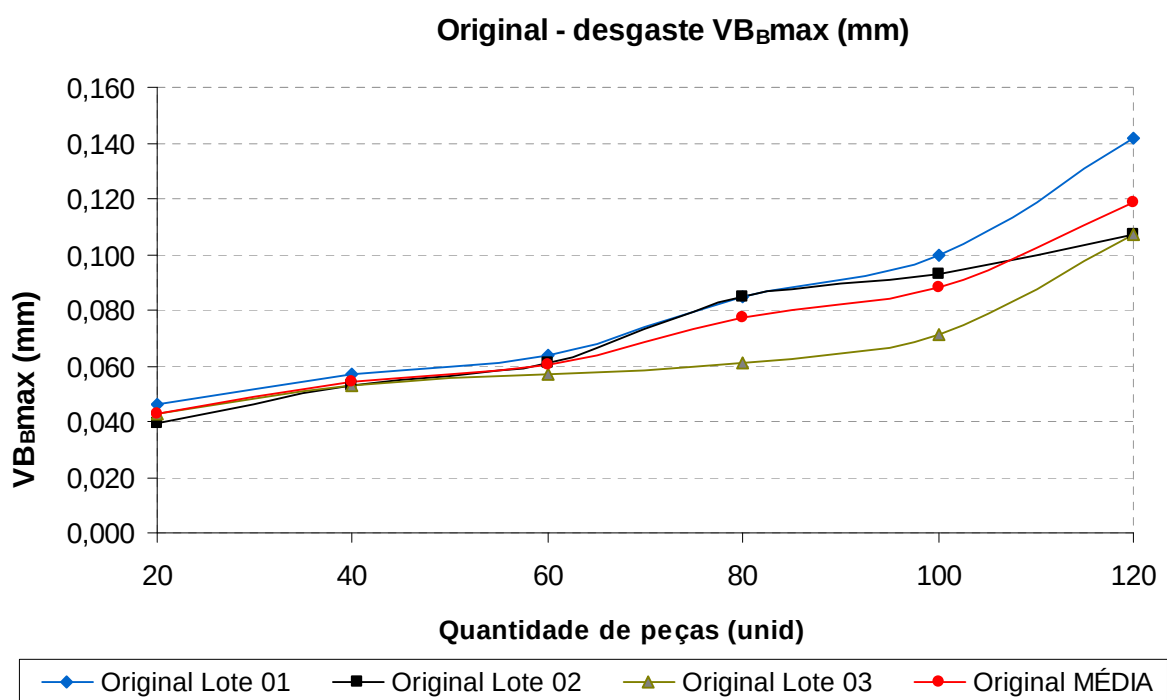
Dados de desgaste das ferramentas.por lote e a média, bem como o gráfico plotado da liga 0,20%HBN.

Peças	Lote 01	Lote 02	Lote 03	Média
	VB _B max (mm)	VB _B max (mm)	VB _B max (mm)	VB _B max (mm)
20	0,057	0,046	0,039	0,047
40	0,061	0,061	0,068	0,063
60	0,071	0,085	0,085	0,080
80	0,082	0,096	0,093	0,090
100	0,093	0,107	0,114	0,105
120	0,100	0,139	0,128	0,122



Dados de desgaste das ferramentas.por lote e a média, bem como o gráfico plotado da liga original.

Peças	Lote 01 VB _B max (mm)	Lote 02 VB _B max (mm)	Lote 03 VB _B max (mm)	Média VB _B max (mm)
20	0,046	0,039	0,043	0,043
40	0,057	0,053	0,053	0,054
60	0,064	0,061	0,057	0,061
80	0,085	0,085	0,061	0,077
100	0,100	0,093	0,071	0,088
120	0,142	0,107	0,107	0,119

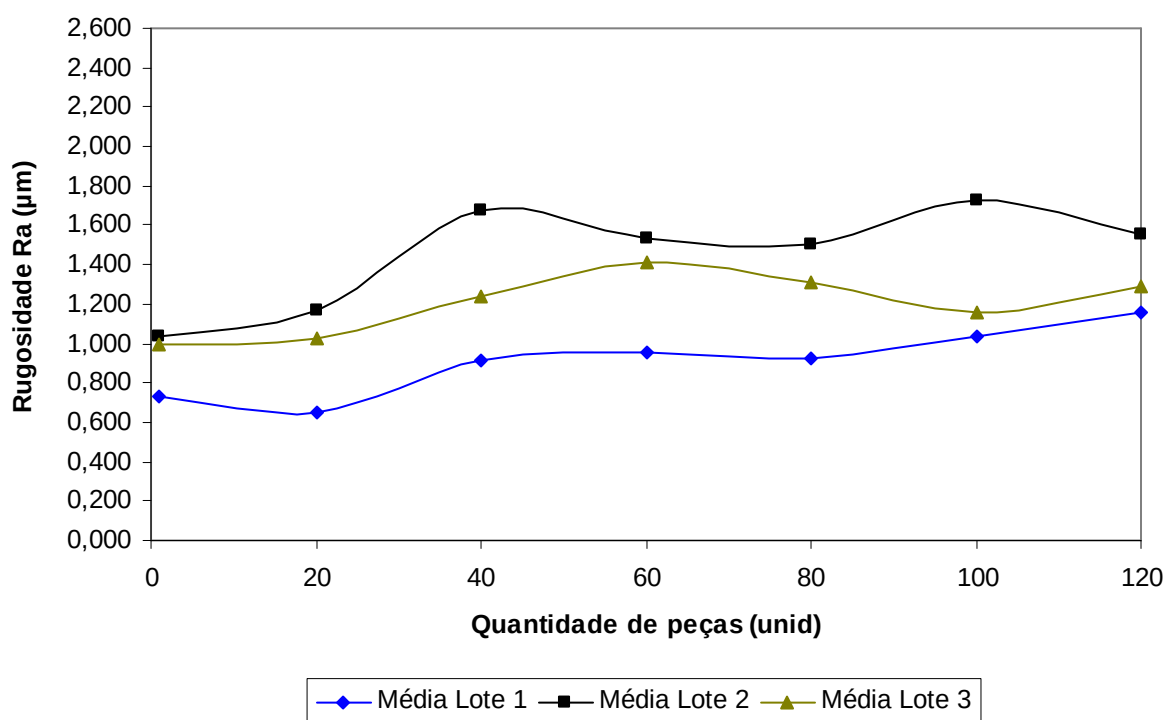


ANEXO 5

Dados das medições de rugosidade Ra por lote e sua média, bem como o gráfico plotado da liga 0,05% HBN.

	Lote 1				Lote 2				Lote 3			
Peça	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média
1	0,730	0,750	0,720	0,733	1,000	0,990	1,130	1,040	1,000	1,100	0,900	1,000
20	0,650	0,610	0,700	0,653	1,100	1,230	1,160	1,163	1,090	0,970	1,030	1,030
40	0,850	0,910	0,980	0,913	1,630	1,680	1,720	1,677	1,200	1,300	1,230	1,243
60	0,910	0,980	0,960	0,950	1,450	1,470	1,670	1,530	1,480	1,370	1,390	1,413
80	0,920	0,910	0,930	0,920	1,430	1,500	1,570	1,500	1,250	1,300	1,380	1,310
100	0,980	1,070	1,050	1,033	1,800	1,570	1,810	1,727	1,100	1,220	1,160	1,160
120	1,150	1,130	1,180	1,153	1,490	1,600	1,570	1,553	1,200	1,340	1,320	1,287

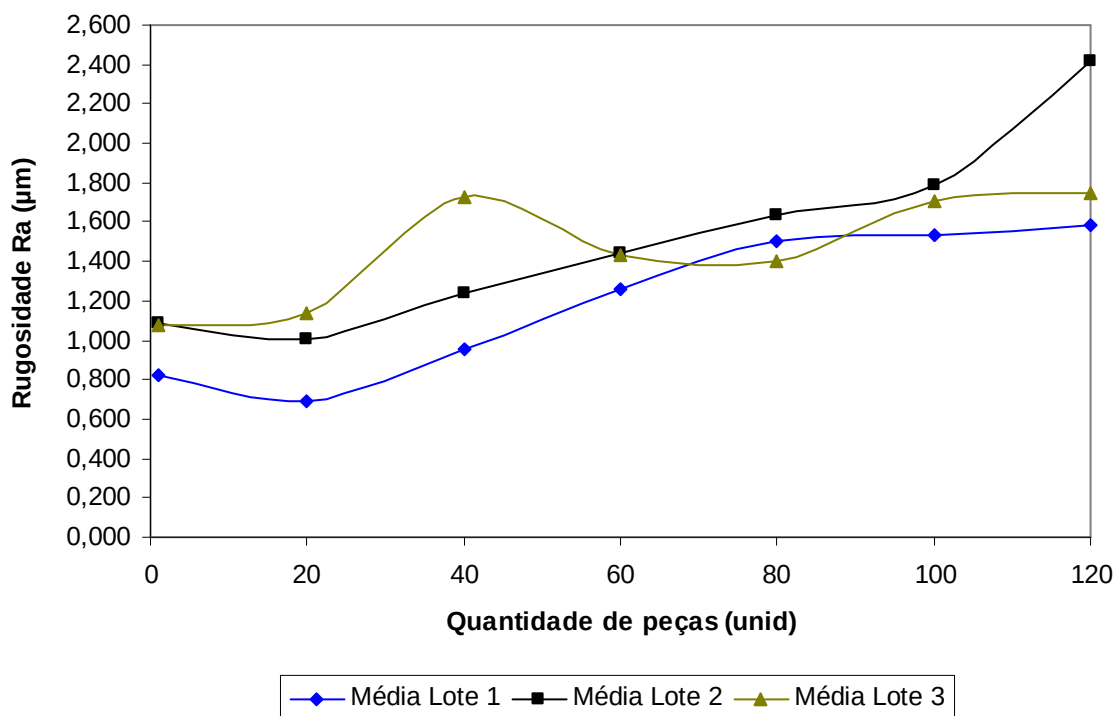
0,05% HBN - Média das medições em Ra (μm)



Dados das medições de rugosidade Ra por lote e sua média, bem como o gráfico plotado da liga 0,10%HBN.

	Lote 1				Lote 2				Lote 3			
Peça	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média
1	0,800	0,840	0,840	0,827	1,000	1,100	1,170	1,090	0,990	1,050	1,180	1,073
20	0,730	0,650	0,700	0,693	0,960	0,970	1,090	1,007	1,130	0,970	1,300	1,133
40	0,900	0,950	1,020	0,957	1,240	1,270	1,220	1,243	1,680	1,700	1,800	1,727
60	1,150	1,340	1,300	1,263	1,400	1,470	1,450	1,440	1,520	1,340	1,430	1,430
80	1,290	1,670	1,550	1,503	1,630	1,570	1,700	1,633	1,340	1,500	1,360	1,400
100	1,620	1,590	1,400	1,537	1,750	1,750	1,870	1,790	1,760	1,780	1,590	1,710
120	1,640	1,530	1,570	1,580	2,430	2,350	2,460	2,413	1,690	1,780	1,760	1,743

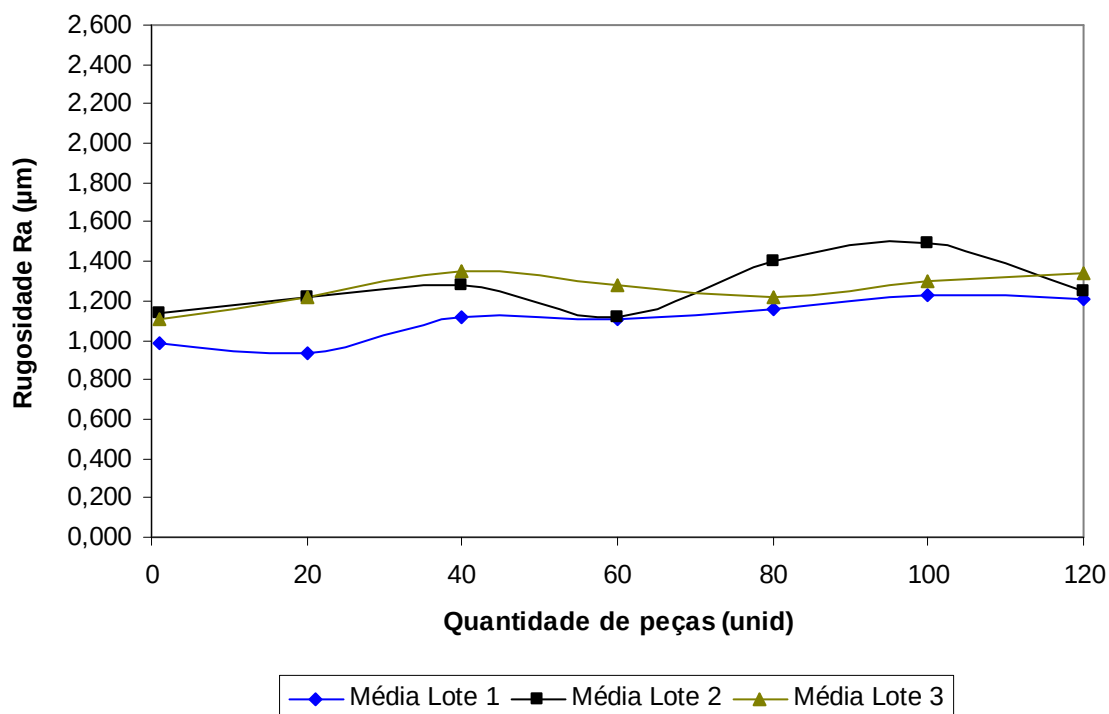
0,10%HBN - Média das medições em Ra (μm)



Dados das medições de rugosidade Ra por lote e sua média, bem como o gráfico plotado da liga 0,15%HBN.

	Lote 1				Lote 2				Lote 3			
Peça	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média
1	1,100	0,940	0,930	0,990	1,190	1,120	1,100	1,137	1,220	1,040	1,060	1,107
20	0,950	0,910	0,930	0,930	1,370	1,220	1,070	1,220	1,230	1,190	1,250	1,223
40	1,070	1,120	1,160	1,117	1,240	1,290	1,310	1,280	1,350	1,400	1,300	1,350
60	1,040	1,200	1,090	1,110	1,100	1,100	1,150	1,117	1,240	1,320	1,280	1,280
80	1,090	1,300	1,090	1,160	1,300	1,520	1,380	1,400	1,290	1,170	1,190	1,217
100	1,220	1,320	1,140	1,227	1,500	1,560	1,410	1,490	1,260	1,270	1,360	1,297
120	1,150	1,260	1,230	1,213	1,380	1,210	1,170	1,253	1,390	1,280	1,340	1,337

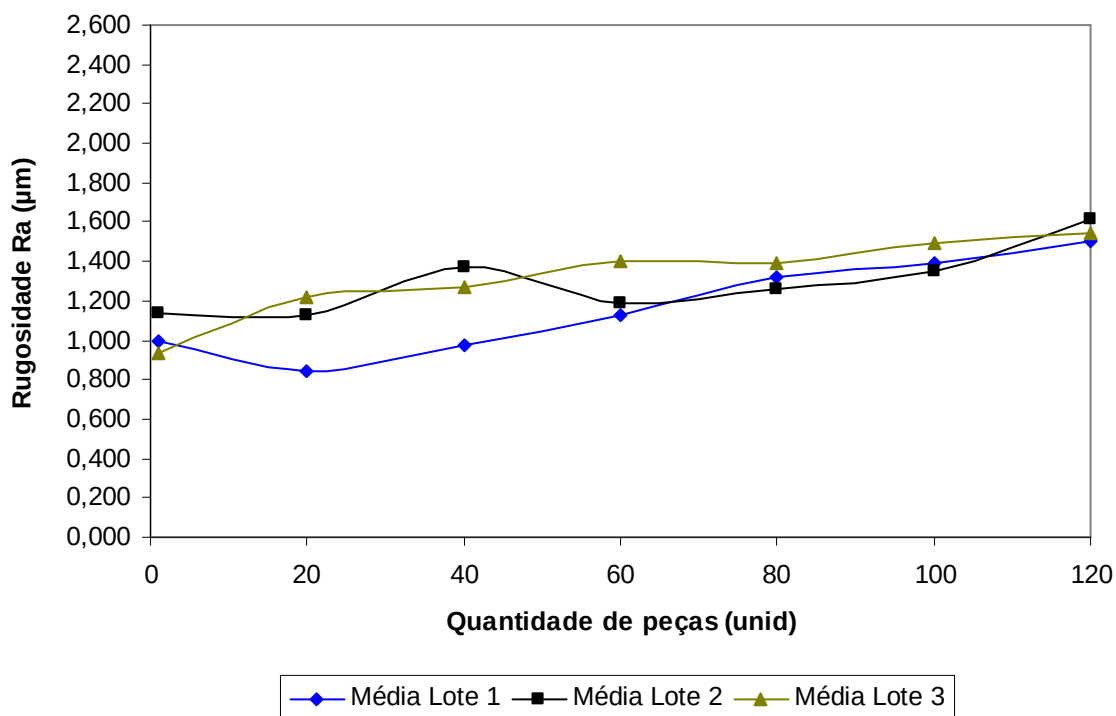
0,15%HBN - Média das medições em Ra (μm)



Dados das medições de rugosidade Ra por lote e sua média, bem como o gráfico plotado da liga 0,20%HBN.

	Lote 1				Lote 2				Lote 3			
Peça	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média
1	0,990	1,060	0,950	1,000	0,990	1,300	1,120	1,137	0,910	1,050	0,830	0,930
20	0,900	0,850	0,780	0,843	1,010	1,290	1,080	1,127	1,250	1,230	1,170	1,217
40	0,940	0,960	1,040	0,980	1,300	1,560	1,250	1,370	1,200	1,270	1,340	1,270
60	1,030	1,200	1,150	1,127	1,220	1,180	1,180	1,193	1,330	1,560	1,300	1,397
80	1,340	1,310	1,320	1,323	1,340	1,170	1,260	1,257	1,380	1,320	1,470	1,390
100	1,430	1,400	1,340	1,390	1,390	1,340	1,330	1,353	1,570	1,420	1,500	1,497
120	1,450	1,560	1,510	1,507	1,620	1,610	1,620	1,617	1,580	1,600	1,450	1,543

0,20%HBN - Média das medições em Ra (μm)



Dados das medições de rugosidade Ra por lote e sua média, bem como o gráfico plotado da liga original.

	Lote 1				Lote 2				Lote 3			
Peça	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média	Med 1	Med 2	Med 3	Média
1	0,680	0,600	0,660	0,647	0,550	0,570	0,590	0,570	0,820	1,050	1,000	0,957
20	0,470	0,450	0,570	0,497	0,550	0,440	0,620	0,537	1,000	0,830	0,930	0,920
40	0,350	0,340	0,520	0,403	0,700	0,780	0,710	0,730	0,840	0,960	0,920	0,907
60	0,710	0,600	0,610	0,640	0,800	0,850	0,840	0,830	1,000	1,020	1,040	1,020
80	0,750	0,780	0,720	0,750	0,650	0,700	0,730	0,693	0,920	0,720	1,000	0,880
100	0,790	0,810	0,780	0,793	0,670	0,690	0,770	0,710	0,930	0,700	0,920	0,850
120	0,970	0,980	0,980	0,977	0,780	0,830	0,880	0,830	1,100	0,900	1,000	1,000

Original - Média das medições em Ra (μm)

