

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA
MARCELO FRANCISCO HABOWSKI

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA ANÁLISE
TRIBOLÓGICA DE FERRAMENTAS DE CORTE PARA TORNO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC 2)

CURITIBA
2015

LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA
MARCELO FRANCISCO HABOWSKI

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA ANÁLISE
TRIBOLÓGICA DE FERRAMENTAS DE CORTE PARA TORNO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Hioki

Co Orientador: Prof. Dr. Márcio Mafra

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE FERRAMENTAS DE CORTE PARA TORNO”, realizada pelos alunos LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA e MARCELO FRANCISCO HABOWSKI como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Daniel Hioki
UTFPR – DAMEC
Orientador

Prof. Dr. Márcio Mafra
UTFPR – DAMEC
Co Orientador

Prof. Dr. Julio Cesar Klein das Neves
UTFPR – DAMEC
Avaliador

Prof. Dr. Walter Luís Mikos
UTFPR – DAMEC
Avaliador

Curitiba, 14 de julho de 2015

RESUMO

LIMA, Luiz Henrique Sartori; HABOWSKI, Marcelo Francisco. Desenvolvimento de dispositivo para análise tribológica de ferramentas de corte para torno. 2015. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Ao longo do tempo muitos foram os avanços tecnológicos na área da indústria de usinagem, de forma a se obter novas máquinas e novos tipos de ferramentas de corte. No entanto, estes novos tipos de ferramentas são desenvolvidos para se obter máximo desempenho em máquinas também novas, onde problemas como folgas e vibrações são mínimos. Entretanto, tais máquinas são inviáveis financeiramente para a grande maioria das empresas de menor porte, nas quais ainda é comum a presença de máquinas mais simples. Por este motivo, aqueles problemas já citados são aparentes, tornando o uso dos novos tipos de ferramentas inapropriado. Desta forma, faz-se necessária a busca por melhorias para esta parcela da indústria. Nesse sentido, este trabalho visa dar sequência ao estudo de melhorias em ferramentas de aço rápido com tratamento duplex. Assim, foi desenvolvido um dispositivo para a avaliação de amostra quanto ao seu desempenho em desgaste. Para tanto, foram projetados suportes de fixação para a plataforma piezométrica e para as amostras, bem como desenvolvida a metodologia para a realização dos ensaios, a qual foi validada por meio de testes com o dispositivo e caracterização em microscópio (estéreo e confocal).

Palavras chave: Ferramentas de corte; Tratamento duplex; Dispositivo de avaliação; Validação; Desgaste.

ABSTRACT

LIMA, Luiz Henrique Sartori; HABOWSKI, Marcelo Francisco. Development of a device for tribological analysis of cutting tools for lathes. 2015. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Through time, many were the technological advances in the field of machining inside the industry, with the development of new machines and types of cutting tools. However, these new types of tools are developed to obtain maximum performance in machines which are also new and, thus, suffer little from clearance fits and vibration. Nonetheless, such machines are financially impracticable for the vast majority of small businesses, where simpler machinery is still ubiquitous. For this reason, the problems mentioned above are apparent, and the utilization of newer types of tools becomes inappropriate. This is why it is necessary to search for improvements in this sector of the industry. Being so, this project aims to continue the study of improvements to duplex-treated high-speed steel tools. Therefore, a device for the evaluation of the performance of samples, in relation to wear, was developed. To accomplish this, fixation bases were designed for the piezoelectric platform as well as for the samples. A methodology was also elaborated for conducting trials, and it was validated through trials by using both the developed device and by microscope analysis (stereo and confocal).

Keywords: Cutting tools. Duplex treatment. Evaluation device. Validation. Wear.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CLASSIFICAÇÕES E COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE AÇOS RÁPIDOS (VALORES MÉDIOS).....	18
FIGURA 2 – PROPRIEDADES DAS CAMADAS DE TiN, NITRETADA E DUPLEX.....	19
FIGURA 3 – LARGURA DO DESGASTE DE FLANCO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE USINAGEM PARA BROCAS DE AÇO RÁPIDO COM TRATAMENTO DUPLEX (PRETO) E COM TRATAMENTO SOMENTE DE PVD (BRANCO).....	20
FIGURA 4 – INDENTAÇÃO ROCKWELL C EM AMOSTRA PREPARADA POR LIXAMENTO NA GRANULOMETRIA 220.....	21
FIGURA 5 – INDENTAÇÃO ROCKWELL C EM AMOSTRA PREPARADA POR POLIMENTO.....	22
FIGURA 6 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE CONTATO NÃO CONFORME.....	23
FIGURA 7 – (a) CONTATO DE HERTZ ENTRE DOIS CILINDROS E (b) A DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA ÁREA PLANA DE CONTATO.....	23
FIGURA 8 – IMAGENS ISOCROMÁTICAS DE UM CONTATO CILINDRO-PLANO COM (a) CARREGAMENTO NORMAL (ESTÁTICO) E (b) CARREGAMENTOS NORMAL E TANGENCIAL (DINÂMICO).....	25
FIGURA 9 – DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM PARA PROCESSOS DE TORNEAMENTO TRIDIMENSIONAL.....	27
FIGURA 10 – DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM PARA PROCESSOS DE TORNEAMENTO BIDIMENSIONAL.....	28
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESPESSURA MÍNIMA DE PENETRAÇÃO PARA CORTE E DA FORMAÇÃO DO CAVACO.....	29
FIGURA 12 – DETERMINAÇÃO DA FORÇA RESIDUAL ATRAVÉS DO MÉTODO DA EXTRAPOLAÇÃO A ZERO NA USINAGEM A SECO DO AÇO ABNT 1045 COM FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO – ENSAIO CRESCENTE.....	30
FIGURA 13 - DETERMINAÇÃO DA FORÇA RESIDUAL ATRAVÉS DO MÉTODO DA EXTRAPOLAÇÃO A ZERO NA USINAGEM A SECO DO AÇO ABNT 1045 COM FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO – ENSAIO DECRESCENTE.....	31
FIGURA 14 - DETERMINAÇÃO DA FORÇA RESIDUAL ATRAVÉS DO MÉTODO DA EXTRAPOLAÇÃO A ZERO NA USINAGEM A SECO DO AÇO ABNT 1045 COM FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO.....	31
FIGURA 15 – REGIÕES DE ATRITO NO PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	32
FIGURA 16 – ZONAS DE ADERÊNCIA E DE ESCORREGAMENTO.....	33
FIGURA 17 – DIAGRAMA DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE CORTE.....	38
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA PARA FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO.....	39

FIGURA 19 – ETAPAS DE PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	40
FIGURA 20 – BITS DE AÇO RÁPIDO M2 E REGIÕES DE MEDIÇÃO DE DUREZA	41
FIGURA 21 – DIMENSÕES DAS AMOSTRAS	42
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO DA AMOSTRA	42
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REATOR DO LABORATÓRIO DE PLASMA DA UTFPR.....	43
FIGURA 24 – REATOR DO LABORATÓRIO DE PLASMA DA UTFPR	44
FIGURA 25 – AMOSTRAS DURANTE O PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA	45
FIGURA 26 – SUPORTE PARA AS AMOSTRAS	46
FIGURA 27 – MARCAÇÕES REALIZADAS PARA IDENTIFICAÇÃO: DO NÚMERO DA AMOSTRA, EM VERMELHO; E DO GRUPO DE RUGOSIDADE EM AZUL	47
FIGURA 28 – PONTOS DE MEDIÇÃO	48
FIGURA 29 – (A) PLATAFORMA PIEZELÉTRICA E (B) AQUISITOR/CONVERSOR DE SINAIS (ESQUERDA) E AMPLIFICADOR (DIREITA).....	51
FIGURA 30 – CONEXÕES DOS CABOS (1 A 8) NO AQUISITOR/CONVERSOR DE SINAIS	52
FIGURA 31 – ORIENTAÇÃO DOS EIXOS NA PLATAFORMA PIEZELÉTRICA	52
FIGURA 32 – INTERFACE GRÁFICA DO LabVIEW Signal Express: 1- DISPLAYS RESPONSÁVEIS PELO MONITORAMENTO AO VIVO DOS CANAIS SELECIONADOS; 2 – LEGENDAS E CONTROLE DE EXIBIÇÃO DE CANAIS; 3 – LISTA DE GRAVAÇÕES	53
FIGURA 33 – GRÁFICO (VOLTS VS. SEGUNDOS) MOSTRANDO O ERRO CUMULATIVO PARA O EIXO Z. EXPERIMENTO REALIZADO SEM QUE HOUVESSE QUALQUER APLICAÇÃO DE CARGA SOBRE A PLATAFORMA.....	54
FIGURA 34 – ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO	55
FIGURA 35 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO, ONDE 'F _T ' É A FORÇA DE ATRITO, 'F _N ' É A FORÇA NORMAL APLICADA À AMOSTRA E 'n' É A ROTAÇÃO DA BARRA DE TESTE	56
FIGURA 36 – DIMENSÕES E VISTA ISOMÉTRICA DA BARRA DE TESTE PREPARADA PARA OS ENSAIOS	58
FIGURA 37 – MICROESTRUTURA DO AÇO UTILIZADO PARA A BARRA DE TESTE	59
FIGURA 38 – FUNÇÃO LEVEL, ATRAVÉS DO MÉTODO DO PLANO DEFINIDO POR TRÊS PONTOS.....	62
FIGURA 39 – RETIRADA DO CASTELO (A PARA B) PARA FIXAÇÃO DA PLATAFORMA PIEZELÉTRICA NO TORNO	63

FIGURA 40 – POSIÇÃO DAS ABAS DA PLATAFORMA EM RELAÇÃO AO CARRO TRANSVERSAL DO TORNO.....	64
FIGURA 41 – OS TRÊS PRIMEIROS COMPONENTES DO SUPORTE DE FIXAÇÃO DA PLATAFORMA, RESTRINGINDO-A NO SENTIDO DE MOVIMENTO DO CARRO TRANSVERSAL.....	65
FIGURA 42 – OS DEMAIS COMPONENTES DO SUPORTE DE FIXAÇÃO DA PLATAFORMA MONTADOS, RESTRINGINDO-A EM TODOS OS SENTIDOS DE MOVIMENTO.....	65
FIGURA 43 – POSICIONAMENTO DO PISTÃO PNEUMÁTICO E DA GUIA LINEAR DE ESFERAS/TRILHO	66
FIGURA 44 – MODELO DA CHAPA DE FIXAÇÃO DOS COMPONENTES.....	67
FIGURA 45 – PORTA AMOSTRAS	67
FIGURA 46 – SUPORTE DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	68
FIGURA 47 – REGIÃO DO CONTATO PARA O 1º TESTE PRELIMINAR	69
FIGURA 48 – REGIÃO DO CONTATO PARA O 2º TESTE PRELIMINAR	69
FIGURA 49 – REGIÃO DO CONTATO PARA A AMOSTRA DO 3º TESTE PRELIMINAR	71
FIGURA 50 – REGIÃO DO CONTATO PARA A AMOSTRA DO 4º TESTE PRELIMINAR	74
FIGURA 51 – REGIÃO DO CONTATO PARA AS AMOSTRAS LIXADAS NA GRANULOMETRIA 220.....	77
FIGURA 52 – RECONSTRUÇÃO 3D DA REGIÃO DO CONTATO DA AMOSTRA 3 (AMPLIAÇÃO DO EIXO Z EM 7%).....	78
FIGURA 53 – REGIÃO DO CONTATO PARA AS AMOSTRAS LIXADAS NA GRANULOMETRIA 600.....	81
FIGURA 54 – RECONSTRUÇÃO 3D DA REGIÃO DO CONTATO DA AMOSTRA 3 (AMPLIAÇÃO DO EIXO Z EM 7%).....	84
FIGURA 55 – REGIÃO DO CONTATO PARA AS AMOSTRAS POLIDAS	85
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS PREPARADAS NA GRANULOMETRIA 220 (À ESQUERDA) E POR POLIMENTO (À DIREITA)	89
FIGURA 57 – RECONSTRUÇÃO 3D DA REGIÃO DO CONTATO DA AMOSTRA 220-3 (AMPLIAÇÃO DO EIXO Z EM 7%)	90
FIGURA 58 – RECONSTRUÇÃO 3D DA REGIÃO DO CONTATO DA AMOSTRA POLIDA-3 (AMPLIAÇÃO DO EIXO Z EM 7%)	90

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – VALORES DO PARÂMETRO S_a DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS NITRETADAS	50
GRÁFICO 2 – VALORES DO PARÂMETRO S_q DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS NITRETADAS	50
GRÁFICO 3 – EVOLUÇÃO DA FORÇA MÉDIA NORMAL (N) NO TEMPO (s) PARA O 3º TESTE PRELIMINAR	71
GRÁFICO 4 – EVOLUÇÃO DA FORÇA MÉDIA DE ATRITO (N) NO TEMPO (s) PARA O 3º TESTE PRELIMINAR	72
GRÁFICO 5 – EVOLUÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO TEMPO (s) PARA O 3º TESTE PRELIMINAR	72
GRÁFICO 6 – EVOLUÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO NOS QUATRO PRIMEIROS MINUTOS DO TESTE	73
GRÁFICO 7 – EVOLUÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO INTERVALO DE 6-12 MINUTOS DO TESTE	73
GRÁFICO 8 – EVOLUÇÃO DA FORÇA MÉDIA NORMAL (N) NO TEMPO (s) PARA O 4º TESTE PRELIMINAR	74
GRÁFICO 9 – EVOLUÇÃO DA FORÇA MÉDIA DE ATRITO (N) NO TEMPO (s) PARA O 4º TESTE PRELIMINAR	75
GRÁFICO 10 – EVOLUÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO TEMPO (s) PARA O 4º TESTE PRELIMINAR	75
GRÁFICO 11 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DA FORÇA NORMAL (N)	78
GRÁFICO 12 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DA FORÇA DE ATRITO (N)	79
GRÁFICO 13 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DO COEFICIENTE DE ATRITO	79
GRÁFICO 14 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DA FORÇA NORMAL (N)	82
GRÁFICO 15 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DA FORÇA DE ATRITO (N)	82
GRÁFICO 16 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DO COEFICIENTE DE ATRITO	83
GRÁFICO 17 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DA FORÇA NORMAL (N)	86
GRÁFICO 18 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DA FORÇA DE ATRITO (N)	86
GRÁFICO 19 – EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DA CURVA DE TENDÊNCIA (POLINÔMIO DO 5º GRAU) DO COEFICIENTE DE ATRITO	87
GRÁFICO 20 – CURVAS DE TENDÊNCIA PARA EVOLUÇÃO NO TEMPO (s) DO COEFICIENTE DE ATRITO DAS AMOSTRAS LIXADAS NA GRANULOMETRIA 220 E DAS AMOSTRAS POLIDAS	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE E SUAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	16
TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO M2	18
TABELA 3 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS VALORES DE DUREZA PARA OS BITS NO ESTADO DE FORNECIMENTO	41
TABELA 4 – ETAPAS REALIZADAS DURANTE O PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA	44
TABELA 5 – DUREZA VICKERS HV 20/10 APÓS A NITRETAÇÃO A PLASMA	45
TABELA 6 – DUREZA VICKERS HV 3/3 APÓS A NITRETAÇÃO A PLASMA	46
TABELA 7 – SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A GERAÇÃO DE RUGOSIDADE	47
TABELA 8 – SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	48
TABELA 9 – VALORES DO PARÂMETRO Sa DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS NITRETADAS	49
TABELA 10 – VALORES DO PARÂMETRO Sq DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS NITRETADAS	49
TABELA 11 – VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO PARA A DUREZA DO MATERIAL DA BARRA DE TESTE	58
TABELA 12 – CONDIÇÕES UTILIZADAS NOS TESTES PRELIMINARES DO DISPOSITIVO	60
TABELA 13 – CONDIÇÕES UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO	61
TABELA 14 – RESUMO QUALITATIVO DOS RESULTADOS ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS LIXADAS E POLIDAS	92
TABELA 15 – CONDIÇÕES RECOMENDADAS DE OPERAÇÃO PARA O DISPOSITIVO	93

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. CONTEXTO DO TEMA	12
1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.3. OBJETIVOS	13
1.3.1. Objetivo Geral.....	13
1.3.2. Objetivos Específicos	13
1.4. JUSTIFICATIVA	14
1.5. CONTEÚDO DO TRABALHO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	16
2.2. AÇOS FERRAMENTA E AÇOS RÁPIDOS	17
2.3. AÇO RÁPIDO M2	17
2.4. TRATAMENTO DUPLEX	19
2.5. INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NA ADESÃO DA CAMADA DE TiN	21
2.6. TIPOS DE CONTATO	22
2.6.1. Contato de Hertz	22
2.6.2. Carregamento Dinâmico.....	24
2.7. FORÇAS DE USINAGEM NO PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	26
2.7.1. Força Residual de Usinagem	29
2.8. ATRITO EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO	32
2.9. FALHAS E FIM DE VIDA EM FERRAMENTAS DE CORTE	33
2.9.1. Tipos de Desgaste em Ferramentas de Corte.....	34
2.9.2. Mecanismos de Desgaste	35
2.9.2.1. Adesão	35
2.9.2.2. Abrasão	35
2.9.2.3. Difusão	36
2.9.2.4. Oxidação	36
2.9.2.5. Fadiga Superficial.....	37
2.9.3. Desgaste em Ferramentas de Aço Rápido.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	40
3.1.1. Aquisição do Aço Rápido M2.....	41
3.1.2. Medição de Dureza no Estado de Fornecimento.....	41
3.1.3. Corte das Amostras.....	41
3.1.4. Preparação das Amostras para Nitretação a Plasma.....	43

3.1.5. Tratamento de Nitretação a Plasma	43
3.1.6. Medição de Dureza após o Tratamento de Nitretação a Plasma	45
3.1.7. Geração de Rugosidades	46
3.1.8. Identificação das Amostras.....	47
3.1.9. Caracterização Superficial no Rugosímetro 3D.....	48
3.1.10. Tratamento de Deposição Física a Vapor (PVD)	51
3.2. ESTUDO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E MONITORAMENTO DE DADOS	51
3.3. DESENVOLVIMENTO DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO	55
3.3.1. Análise da Situação Problema.....	55
3.3.2. Projeto dos Suportes de Fixação da Plataforma Piezelétrica e das Amostras	56
3.4. AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO	57
3.4.1. Testes Preliminares.....	59
3.4.2. Validação do Dispositivo.....	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1. DESENVOLVIMENTO DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO	63
4.1.1. Projeto do Suporte de Fixação da Plataforma Piezelétrica.....	63
4.1.2. Projeto do Suporte de Fixação das Amostras	66
4.2. AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO	68
4.2.1. Testes Preliminares.....	68
4.2.1.1. Testes Preliminares 01 e 02	69
4.2.1.2. Teste Preliminar 03.....	70
4.2.1.3. Teste Preliminar 04.....	74
4.2.2. Ensaios de Validação	76
4.2.2.1. Amostras Preparadas na Granulometria 220	76
4.2.2.2. Amostras Preparadas na Granulometria 600	80
4.2.2.3. Amostras Preparadas por Polimento	83
4.2.2.4. Comparação entre as Amostras Preparadas na Granulometria 220 e por Polimento	87
5. CONCLUSÕES	93
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE I	99
APÊNDICE II	104

1 INTRODUÇÃO

Os aços ferramenta, como o próprio nome indica, são utilizados na indústria metal mecânica para a confecção de ferramentas, tanto de usinagem quanto de conformação mecânica. Dentre eles, destacam-se os chamados aços rápidos.

As principais características de um aço rápido são (em relação a aços comuns): resistência estrutural a altas temperaturas, alta dureza e alta resistência à abrasão (OBERG, 2012) (CORMIER, 2006). Vale também notar que, além destes fatores, um dos principais motivos pelos quais estes aços são comumente utilizados é o seu baixo custo em relação a outros materiais que desempenham funções semelhantes, como o metal duro (DEMATTÉ, 2006).

Apesar disso, é de interesse financeiro geral que uma ferramenta possa vir a gerar produtos de qualidade, com o custo mais baixo, e no período de tempo mais curto possível. Para tanto, é constante a busca pelo aprimoramento dessa ferramenta e, conseqüentemente, prolongamento da sua vida útil. No caso das ferramentas de aço rápido, a vida útil está relacionada principalmente ao desgaste de flanco (NOGUEIRA, 2004).

Sendo assim, há hoje na indústria uma grande demanda de processos através dos quais seja possível aprimorar o desempenho destas ferramentas de aço rápido. Um destes processos é o tratamento duplex, considerado um dos meios mais eficientes de se aumentar a vida útil da ferramenta (FOX-RABINOVICH et al., 2002).

1.1 CONTEXTO DO TEMA

O presente projeto fora idealizado como parte de um trabalho mais abrangente que visa o melhoramento do desempenho e o prolongamento da vida útil de ferramentas de corte de aço rápido M2 com tratamento duplex. Para este fim, cabe um estudo contemplando desde a identificação dos parâmetros adequados para o tratamento, até os testes de desempenho das amostras tratadas.

Desta forma, a etapa inicial deste estudo se deu com o trabalho realizado por Dos Anjos, Iha e Fernandes (2009), que visava compreender os efeitos da nitretação a plasma do aço M2 na preparação para o tratamento duplex. Em

sequência, o trabalho de Seika e Kowalski (2014) veio por estudar a influência da rugosidade superficial sobre a adesão do revestimento de nitreto de titânio (TiN) obtido por PVD (Physical Vapor Deposition).

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os estudos de Dos Anjos, Iha e Fernandes (2009) e Seika e Kowalski (2014) tiveram como objetivo a determinação dos parâmetros adequados para o tratamento de nitretação a plasma; a análise da influência da rugosidade superficial na adesão do revestimento; o desenvolvimento e a caracterização do revestimento produzido pelo tratamento duplex.

No entanto, não foram realizados testes relativos ao desempenho em termos de desgaste das amostras tratadas, determinando então a próxima etapa a ser desenvolvida.

Assim sendo, o problema a ser resolvido pelo presente trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo que permita a realização de testes no torno mecânico convencional, em condições controladas, a fim de se estudar o desempenho de amostras tratadas sob os parâmetros obtidos naqueles trabalhos anteriores.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar um dispositivo, para torno mecânico convencional, que permita a avaliação de desempenho quanto ao desgaste de amostras de aço rápido M2 com tratamento duplex.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Desenvolvimento do dispositivo:
 - i. Projetar um suporte para fixação das amostras sobre a plataforma piezelétrica para ensaios no torno;

- ii. Definir a metodologia e as condições para a realização dos ensaios;
- iii. Executar ensaios preliminares.

b) Validar o dispositivo:

- i. Submeter as amostras (preparadas em condições distintas) a ensaios de desgaste no dispositivo;
- ii. Caracterizar visual e qualitativamente a superfície das amostras quanto ao desempenho em relação ao desgaste;
- iii. Comparar o desempenho daquelas amostras preparadas nas condições mais extremas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Este projeto é de grande importância e relevância na continuidade dos estudos sobre o tratamento duplex em ferramentas de aço rápido M2, pois permitirá a realização de ensaios de desgaste em condições semelhantes às aquelas observadas durante o processo de usinagem por torneamento, haja vista que o dispositivo será instalado diretamente no torno mecânico. Além disso, por não haver geração de cavaco, o estudo do desgaste pode ser focado na região de maior interesse, a superfície de folga.

1.5 CONTEÚDO DO TRABALHO

O conteúdo do trabalho será dividido em quatro seções, a iniciar pela fundamentação teórica, na qual é apresentado o levantamento de dados sobre: o material utilizado para geração das amostras; o tratamento duplex (nitretação seguida por PVD); influência da rugosidade na adesão do revestimento; a mecânica do contato; as forças atuantes na ferramenta de corte; o fenômeno de atrito em processos de torneamento; e o desgaste em ferramentas de corte.

Em seguida, a seção de Materiais e Métodos descreve como as etapas foram realizadas no decorrer da execução do projeto. Desta forma, são apresentadas: a preparação das amostras; o estudo do sistema de aquisição e

monitoramento de dados; o desenvolvimento dos suportes de fixação; e a etapa dos ensaios, tanto preliminares quanto de validação do dispositivo.

Por sua vez, a terceira seção descreve e apresenta os resultados obtidos. Fazem parte: os suportes de fixação após o processo de fabricação; os dados obtidos nos ensaios preliminares e de validação; a caracterização das superfícies quanto ao desgaste; e a comparação do desempenho daquelas amostras preparadas em condições extremas.

Por fim, a quarta seção traz as conclusões obtidas da execução do trabalho e, ainda, as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

Apesar de existirem vários tipos de ferramentas de corte feitas dos mais diversos materiais, é limitado o número daqueles utilizados hoje na indústria, seja por motivos de custo ou da necessidade de propriedades específicas. Os principais materiais utilizados como ferramenta de corte em usinagem, juntamente com suas aplicações mais comuns, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais para ferramentas de corte e suas características principais

Material	Características
Aços rápidos comuns	Amplamente utilizados em escala industrial, os aços rápidos comuns constituem ferramentas de corte relativamente baratas e com ampla gama de aplicação.
Aços rápidos sinterizados	O processo de sinterização resulta em microestruturas mais refinadas e disposição mais homogênea de carbeto do que em aços rápidos comuns.
Aços rápidos ao cobalto	Apresentam dureza semelhante aos aços rápidos comuns, porém com a capacidade de retê-la a temperaturas muito mais altas, permitindo a utilização com velocidades de corte maiores.
Metal duro	Material compósito de carbeto numa matriz metálica, o metal duro é utilizado em operações mais extremas, nas quais a utilização de aços rápidos não é recomendável ou, até mesmo, inviável.
Cerâmicas	Têm aplicações e custo semelhantes àqueles do metal duro. São refratários e quimicamente inertes na maioria dos casos, porém extremamente frágeis.
Materiais ultraduros	O PCD (diamante poli cristalino) e o CBN (nitreto de boro cúbico) são os dois materiais mais duros que se tem conhecimento. O CBN é normalmente usado na usinagem de materiais ferrosos. Já o PCD, que tende a reagir com o ferro, é recomendado para a usinagem de materiais não ferrosos.

Fonte: adaptado de Edwards, 1993; Stemmer, 2007; e ASM, 1989.

2.2 AÇOS FERRAMENTA E AÇOS RÁPIDOS

Aços ferramenta são empregados na indústria pela sua capacidade de trabalhar sob as condições de altas cargas específicas, grandes variações de temperatura e contato constante com superfícies abrasivas (OBERG, 2012) (CORMIER, 2006).

A AISI (American Iron and Steel Institute) subdivide este tipo de material em diversos grupos de acordo com composição química e tipo de trabalho realizado, dentre os quais se encontram os aços rápidos.

Estes são assim chamados pela sua habilidade de usinar materiais em velocidades consideradas altas à época da sua criação. São ligas complexas de ferro com combinações ao carbono, cromo, vanádio, molibdênio, tungstênio, e em alguns casos cobalto (ASM, 1989) (CORMIER, 2006). Estas combinações são responsáveis por conferir ao aço rápido a estabilidade estrutural em altas temperaturas e as boas resistências ao impacto e ao desgaste, quando comparado aos aços ferramentas comuns (ASM, 1989).

Esses aços podem, ainda, ser divididos em duas categorias básicas, dependendo de seu elemento de liga predominante: ao molibdênio e ao tungstênio. Aços ao molibdênio recebem a classificação AISI M, e aços ao tungstênio, AISI T.

Ainda, como se pode observar na Figura 1, outras subdivisões são comumente adotadas, de acordo com a composição química do aço ferramenta em questão. Deste modo, um número de identificação é colocado ao lado do M ou do T, gerando designações como, por exemplo: M1, M2, T1, T2 (ASM, 1989).

2.3 AÇO RÁPIDO M2

O aço rápido M2 é hoje um dos aços rápidos mais utilizados para aplicações gerais, sendo por isso considerado a classe universal (DOS ANJOS, IHA E FERNANDES, 2009). Isto se deve ao fato do M2 aliar as vantagens econômicas dos aços ao molibdênio – em relação àqueles de tungstênio – com a facilidade de endurecimento através de tratamentos térmicos, além da sua resistência ao desgaste (OBERG, 2012).

Composição Química

AISI – SAE Grau	Tungstênio	Cromo	Vanádio	Molibdênio	Cobalto
M 1	1,5	4,0	1,0	8,5	-
M 2	6,0	4,0	2,0	5,0	-
M 3-1	6,0	4,0	2,4	6,0	-
M 3-2	6,0	4,0	3,0	6,0	-
M 4	5,5	4,5	4,0	4,5	-
M 7	1,7	4,0	2,0	8,75	-
M 10	-	4,0	2,0	8,0	-
M 15	6,5	4,5	5,0	3,0	5,0
M 30	2,0	4,0	1,0	8,0	5,0
M 34	2,0	4,0	2,0	8,5	8,0
M 36	6,0	4,0	2,0	6,0	9,0
M 42	1,5	3,75	1,15	9,5	8,0
T 1	18,0	4,0	1,0	-	-
T 2	18,0	4,0	2,0	-	-
T 3	18,0	4,0	3,0	-	-
T 4	18,0	4,0	1,0	-	5,0
T 5	18,0	4,0	2,0	-	8,0
T 6	22,0	4,5	1,5	-	12,0
T 15	13,0	4,5	5,0	-	5,0

Figura 1 – Classificações e composições químicas de aços rápidos (valores médios)

Fonte: adaptado de Cormier, 2006.

A UNS (Unified Numbering System) define o M2 como tendo a seguinte composição:

Tabela 2 – Composição química do M2

Elemento	Mínimo (%)	Máximo (%)
C	0,78	1,05
Cr	3,75	4,50
Mn	0,15	0,40
Mo	4,50	5,50
P	-	0,03
S	-	0,03
Si	0,20	0,45
V	1,75	2,20
W	5,50	6,75

Fonte: SAE, 1999.

2.4 TRATAMENTO DUPLEX

De acordo com Franco Júnior (2003), o tratamento duplex é a combinação dos tratamentos de nitretação a plasma, primeiro, e de deposição física de vapor (PVD) em seguida. Esta ordem na realização dos tratamentos é extremamente importante, conforme destacado por Nickel et al. (2000), visto que a nitretação melhora significativamente a adesão do revestimento como, por exemplo, o de nitreto de titânio.

Desta forma, o tratamento duplex leva à obtenção de duas camadas distintas sobre a superfície da amostra. As características da camada de TiN-PVD e da camada nitretada podem observadas na Figura 2.

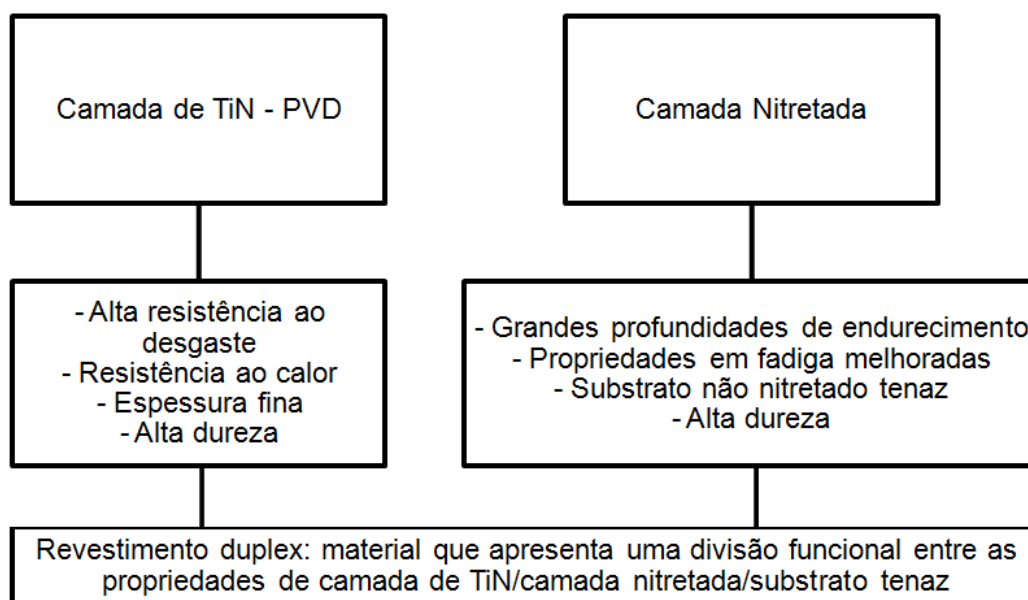


Figura 2 – Propriedades das camadas de TiN, nitretada e duplex

Fonte: adaptado de Höck et al., 1996 (apud FRANCO JÚNIOR, 2003).

Em geral, a literatura indica que o tratamento duplex melhora a resistência ao desgaste das ferramentas de aços rápidos e, por conseguinte, prolonga sua vida útil. Suchánek et al. (2001) chegou a uma perda de massa para o aço rápido M2, com tratamento duplex, de 5% em relação à massa perdida numa amostra sem o tratamento de PVD. Além disso, Nickel et al. (2000), testando brocas de aço rápido, concluiu que o tratamento duplex resulta em menores níveis de desgaste do que um simples tratamento de PVD, sem nitretação anterior, como pode ser observado na

Figura 3. Franco Júnior (2003) encontrou resultados similares para os aços rápidos H13 e D2.

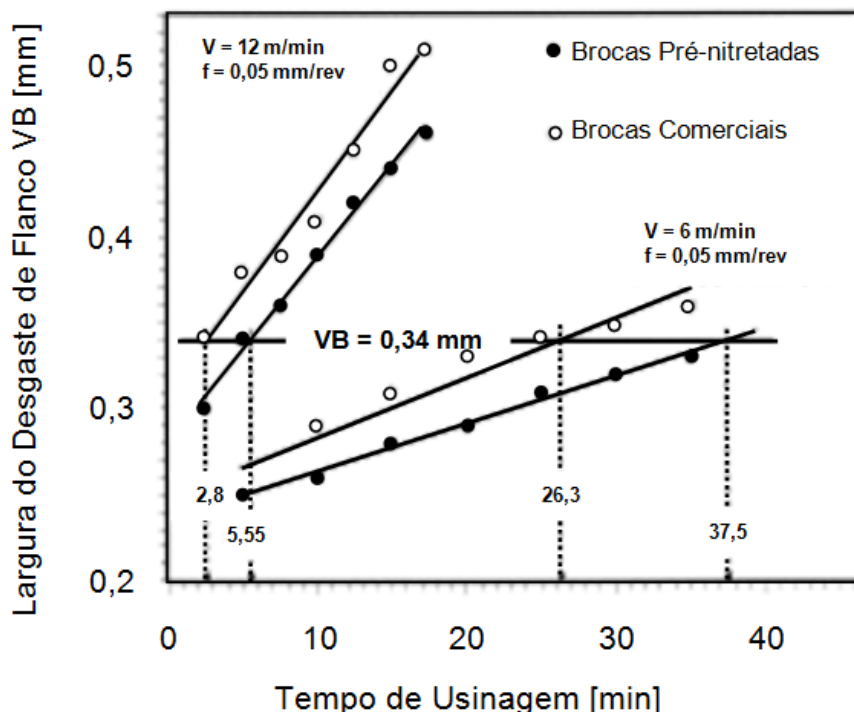


Figura 3 – Largura do desgaste de flanco em função do tempo de usinagem para brocas de aço rápido com tratamento duplex (preto) e com tratamento somente de PVD (branco)

Fonte: adaptado de Nickel et al., 2000.

Nota-se no gráfico acima que tanto para uma velocidade de usinagem de 12 m/min quanto para 6 m/min, o aço rápido com tratamento duplex apresentou, para todos os tempos de usinagem, uma menor taxa de desgaste, determinada através de medição da largura da superfície desgastada. Nickel et al. (2000), chegou a uma constante de vida de ferramenta 'n', calculada através das retas obtidas experimentalmente, de 0,36 para o aço duplex e de 0,3 para o aço somente com tratamento PVD. Além disso, o autor também aponta que o valor de 0,36 encontrado é superior aos valores indicados em sua literatura de referência, tanto para metal duro ($n = 0,25$), quanto para metal duro revestido ($n = 0,30$), sendo ligeiramente inferior apenas às ferramentas de cerâmica ($n = 0,40$).

2.5 INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NA ADESÃO DA CAMADA DE TiN

Para se aproveitar dos benefícios do tratamento duplex, porém, é vital que se observe cuidadosamente a adesão da camada depositada (revestimento). Uma boa ancoragem mecânica do revestimento com a superfície da amostra nitretada irá impedir um possível deslocamento, que encareceria o processo e poderia levar a falhas na ferramenta (SEIKA E KOWALSKI, 2014).

Logo, torna-se necessário controlar a rugosidade superficial para que se obtenha um revestimento suficientemente ancorado. Para isto, Seika e Kowalski (2014) utilizaram lixas com granulometrias 220 e 600, além de processo de polimento, para gerar superfícies com diferentes níveis de rugosidade. Além disso, testaram a adesão do revestimento às amostras através de indentação Rockwell C, a fim de melhor avaliar qual tipo de superfície forneceria a melhor adesão da camada depositada, no caso, de nitreto de titânio.

Seika e Kowalski (2014) concluíram que os melhores resultados – menor quantidade de trincas e pequenas áreas de deslocamento – foram observados para as amostras preparadas na granulometria 220, enquanto os piores nas amostras com superfícies polidas. Estes resultados podem ser observados nas Figuras 4 e 5.

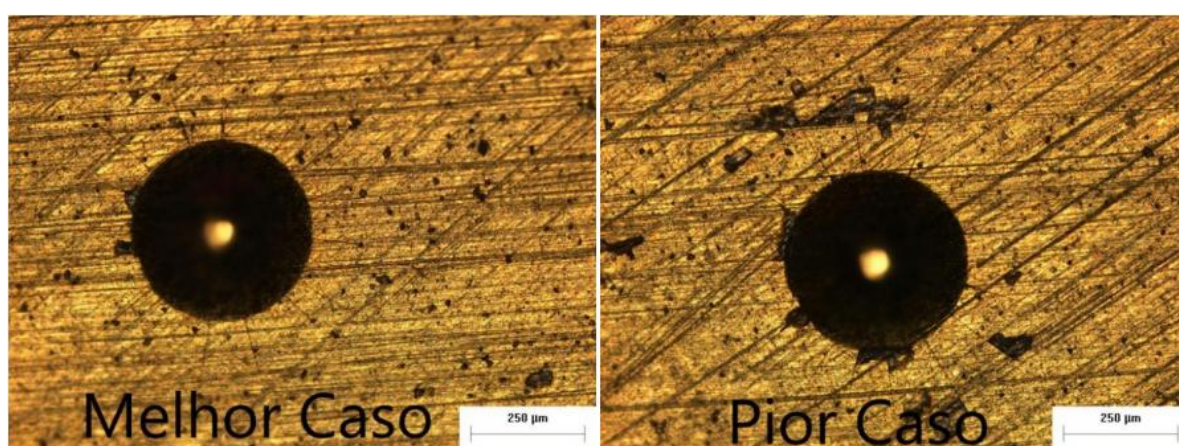


Figura 4 – Indentação Rockwell C em amostra preparada por lixamento na granulometria 220
Fonte: Seika e Kowalski, 2014.

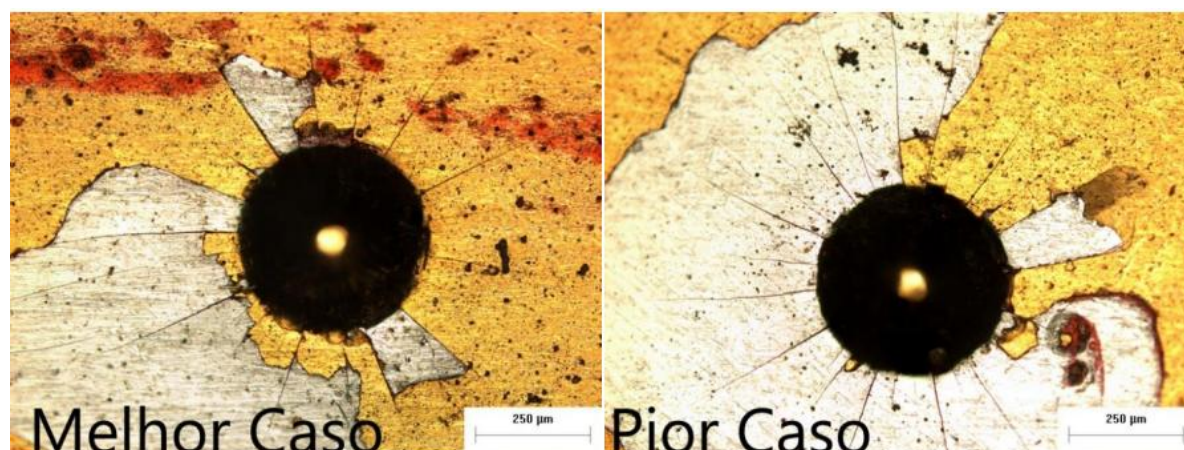


Figura 5 – Indentação Rockwell C em amostra preparada por polimento

Fonte: Seika e Kowalski, 2014.

A fim de melhor compreender a textura das superfícies lixadas e polidas, além de entender sua influência na adesão da camada, Seika e Kowalski (2014) também se utilizaram de medições no rugosímetro 3D. Dentre os diversos parâmetros observados, aqueles que se traduziram em maior ancoragem foram os parâmetros de amplitude, como a Média Aritmética da Rugosidade (S_a) e o Desvio Quadrático Médio (S_q).

2.6 TIPOS DE CONTATO

Os tipos de contato entre duas superfícies podem ser divididos em conforme e não conforme. De acordo com Johnson (1985), o contato é dito conforme quando há contato em vários pontos nas duas superfícies. Analogamente, corpos cujas superfícies são não conformes se encostam primeiro em um ponto e, mesmo sendo aplicada uma carga, as dimensões da área de contato são pequenas quando comparadas às dimensões dos corpos, conforme apresentado na Figura 6.

2.6.1 Contato de Hertz

O modelo de Hertz assume contato não conforme entre dois corpos com superfícies lisas e contínuas, e cada corpo pode ser considerado um semi espaço elástico nas proximidades da região de contato (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009).

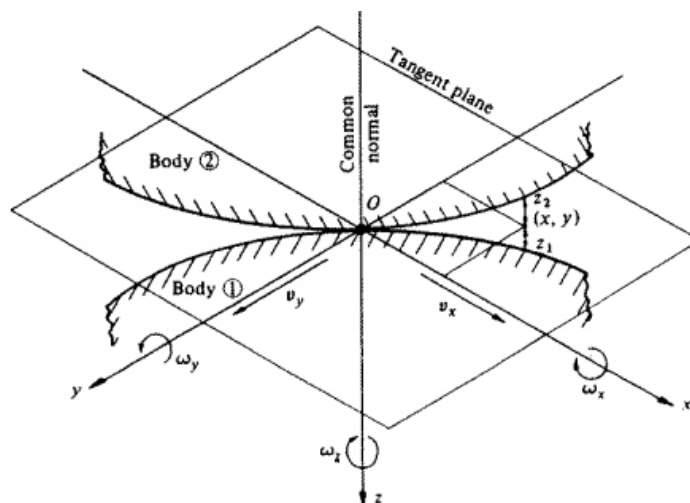


Figura 6 – Desenho esquemático de contato não conforme

Fonte: Johnson, 1985.

Desta forma, segundo o modelo de Hertz, o contato entre um cilindro ($R_1=R$) e uma superfície plana ($R_2=\infty$), com módulos de elasticidade diferentes e pressionados um contra o outro por uma carga normal F , terá como região de contato um plano retangular de largura $2b$, conforme apresentado na Figura 7 (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009) (NORTON, 2013).

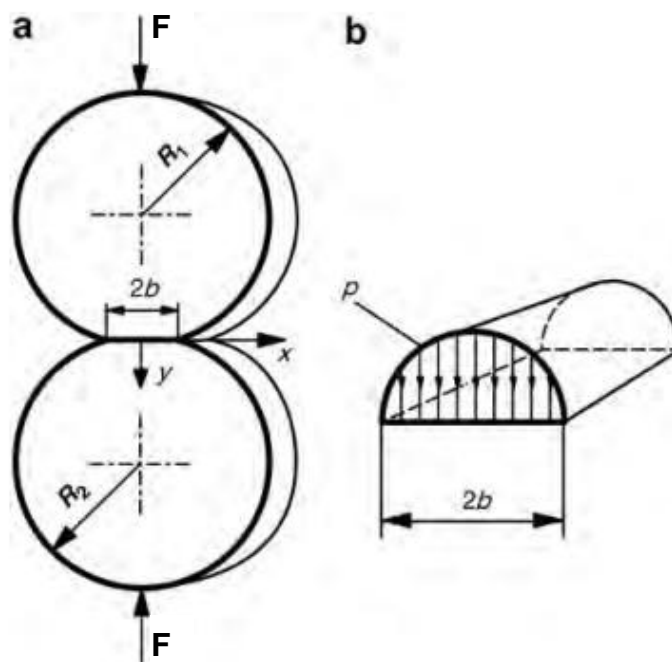


Figura 7 – (a) Contato de Hertz entre dois cilindros e (b) a distribuição de pressão na área plana de contato

Fonte: adaptado de Holmberg e Matthews, 2009.

Desta forma, a distribuição de pressões no contato é definida pela equação (1).

$$p(x) = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot b} \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}} \quad (1)$$

Onde 'L' é o comprimento do contato (no sentido axial para o caso de contato cilindro-plano) e 'x' a coordenada de interesse, conforme pode ser observado na Figura 7. A meia largura de contato 'b' é determinada pela equação (2).

$$b^2 = \frac{4 \cdot F \cdot R^* (m_1 + m_2)}{\pi \cdot L} \quad (2)$$

Onde 'm₁' e 'm₂' são constantes dos materiais, calculadas a partir da equação (3).

$$m = \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad (3)$$

Em que 'ν' é o coeficiente de Poisson e 'E' o módulo de elasticidade do material.

Por fim, também é possível se obter as pressões máxima e média atuantes na região do contato, conforme equações (4) e (5).

$$p_{\text{máx}} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot b \cdot L} \quad (4)$$

$$p_{\text{média}} = \frac{F}{2 \cdot b \cdot L} \quad (5)$$

2.6.2 Carregamento Dinâmico

A Figura 8 demonstra a distribuição de pressões através de imagens isocromáticas. Nota-se que a máxima tensão de cisalhamento ocorre na região logo abaixo da superfície, e que a distribuição de tensões é diferente para casos estáticos e dinâmicos, quando há movimento de deslizamento ou rolamento.

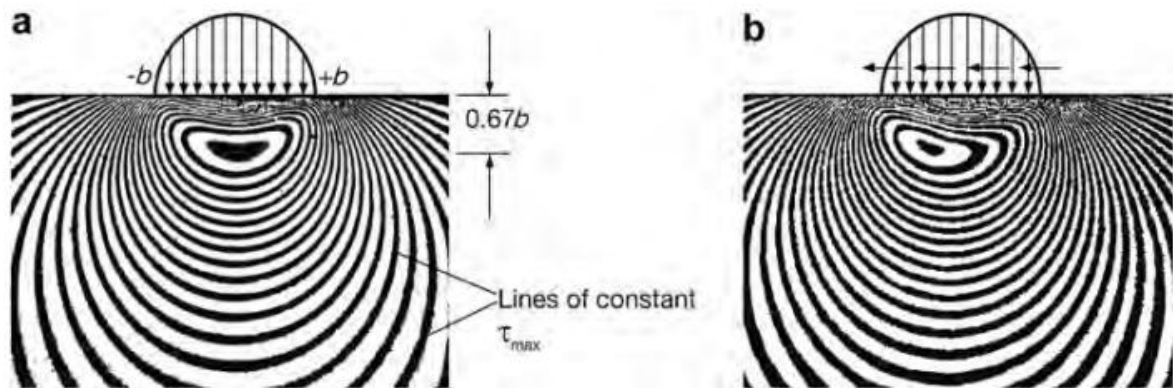


Figura 8 – Imagens isocromáticas de um contato cilindro-plano com (a) carregamento normal (estático) e (b) carregamentos normal e tangencial (dinâmico)

Fonte: adaptado de Holmberg e Matthews, 2009.

Segundo Norton (2013), as tensões de contato dinâmicas são geradas por duas componentes: tangencial e normal. A primeira se deve às forças de atrito, enquanto a segunda se deve às forças normais. A resultante é, portanto, a tensão de contato dinâmica.

As tensões de contato tangenciais para a superfície da região de contato podem ser obtidas através das equações (6) e (7).

$$\sigma_{xt}(x) = -2 * f_{m\acute{a}x} * \frac{x}{b} \quad (6)$$

$$\sigma_{zt} = 0 \quad (7)$$

Em que ' $f_{m\acute{a}x}$ ' é a força de atrito unitária determinada pela equação (8), ' x ' é a coordenada do ponto em análise, na direção do movimento, e ' b ' é a meia largura de contato.

$$f_{m\acute{a}x} = \mu * p_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

Em que ' μ ' é o coeficiente de atrito entre os dois corpos.

As tensões de contato normais para a superfície da região de contato, por sua vez, podem ser obtidas através das equações (9) e (10), adaptadas de Norton (2013).

$$\sigma_{x_n}(x) = -p_{\text{máx}} \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}} \quad (9)$$

$$\sigma_{z_n}(x) = \sigma_{x_n}(x) \quad (10)$$

A tensão total, portanto, é obtida pela sobreposição das componentes, conforme apresentado nas equações (11) e (12).

$$\sigma_x(x) = \sigma_{x_t}(x) + \sigma_{x_n}(x) \quad (11)$$

$$\sigma_z(x) = \sigma_{z_t}(x) + \sigma_{z_n}(x) \quad (12)$$

Segundo Norton (2013) a tensão σ_y é nula para o caso de contato axialmente curto, e as tensões obtidas pelas equações (11) e (12) não representam as tensões principais.

2.7 FORÇAS DE USINAGEM NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Conhecer e quantificar as forças envolvidas no processo de usinagem é de suma importância para a determinação de outras grandezas e para o entendimento de fenômenos relacionados ao processo. Diniz, Marcondes e Coppini (2001) citam a potência necessária para a realização do corte, as tolerâncias da peça, a temperatura atingida no processo e o desgaste da ferramenta como exemplos de grandezas e fenômenos relacionados às forças de usinagem. Além disso, Guo e Chou (2004) ressaltam a importância das forças de usinagem para o projeto de máquinas e desenvolvimento de ferramentas de corte, bem como para a correta seleção das mesmas.

Dentre os processos de usinagem, é abordado neste trabalho o processo de torneamento, que pode ser dividido em tri ou bidimensional. De acordo com a

abordagem tradicionalista, na qual se assume que a ferramenta se encontra perfeitamente afiada – sem a presença de desgaste – a Força de Usinagem (F) pode ser decomposta em três outras forças para o caso tridimensional, conforme apresentado na Figura 9: Força de Corte (F_c), Força de Avanço (F_f) e Força Passiva (F_p), de acordo com a norma DIN 6584 (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (FERRARESI, 1977) (STEMMER, 2007).

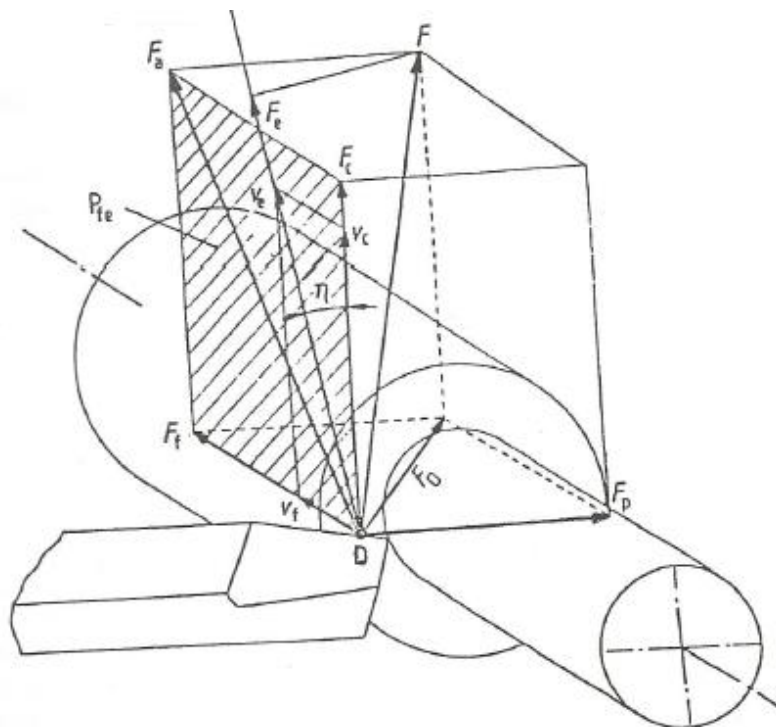


Figura 9 – Decomposição da Força de Usinagem para processos de torneamento tridimensional

Fonte: Stemmer, 2007.

Pequenas diferenças são observadas para o caso de torneamento bidimensional, ou ortogonal, no qual a Força de Usinagem (F) pode ser decomposta em duas componentes: Força de Corte (F_c) e Força de Avanço (F_f), conforme apresentado na Figura 10 (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (FERRARESI, 1977) (STEMMER, 2007).

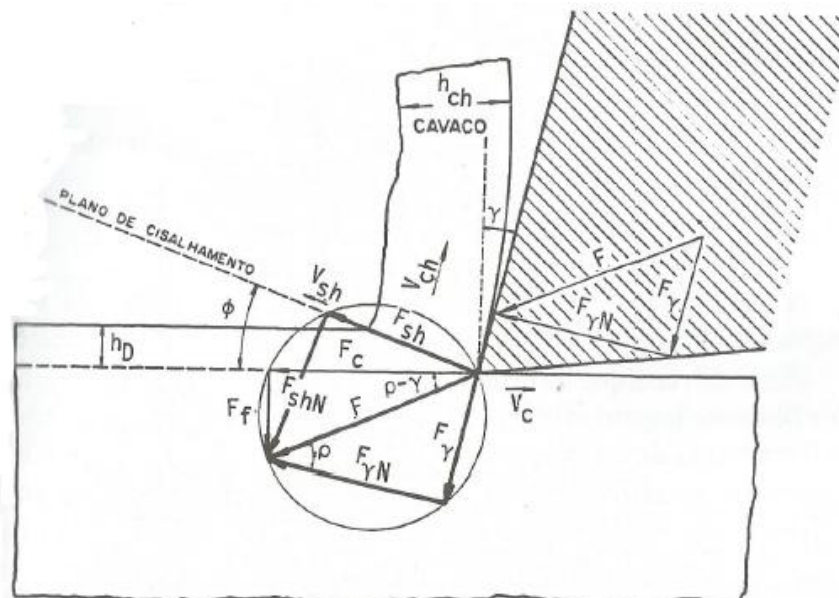


Figura 10 – Decomposição da Força de Usinagem para processos de torneamento bidimensional

Fonte: Stemmer, 2007.

Estas forças são originadas durante o processo de cisalhamento do material para formação do cavaco e da superfície usinada da peça, e estão relacionadas também com o processo de atrito na superfície de saída da ferramenta, o qual se opõe ao fluxo de cavaco (SILVA, 2014).

Ainda, destaca-se que estas componentes de força apresentam módulos diferentes, comumente sendo a Força de Corte a que apresenta o maior módulo, haja vista que a maior parcela da potência de usinagem é destinada justamente ao corte do material da peça (FERRARESI, 1977). Além disso, a componente Passiva não influi na potência de usinagem, no entanto, tem influência na capacidade de obtenção de tolerâncias dimensionais e geométricas na peça (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

A Força de Usinagem, e por consequência suas componentes, são influenciadas por diversos parâmetros e fatores durante o processo de torneamento, como velocidade de corte, material da peça, material e geometria da ferramenta, avanço e profundidade de corte (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

Ainda, há forte influência do desgaste da ferramenta. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), Amorim (2002) e Sikdar e Chen (2002), o módulo da Força de Usinagem é aumentado conforme o desgaste da ferramenta de corte evolui. Assim, para os aços rápidos, a Força de Usinagem é influenciada pelo

desgaste na superfície de folga, embora muitos autores assumam a hipótese da ferramenta estar perfeitamente afiada e considerar apenas a clássica decomposição de forças.

2.7.1 Força Residual de Usinagem

Uma segunda abordagem quanto aos esforços de usinagem destaca a existência e a importância de outra força, a qual está relacionada à existência de raio de arredondamento ou de desgaste na superfície de folga da ferramenta, e que tradicionalmente não é levada em conta, denominada Força de Sulcamento ou Força Residual (GUO E CHOU, 2004) (STEVENSON, 1998).

Segundo Guo e Chou (2004), tal força é definida como a força aplicada ao material (e, portanto, suportada pela ferramenta) no exato instante anterior à formação do cavaco.

Para Silva (2008), a Força Residual está relacionada à existência de deformação elástica nos materiais durante o processo de usinagem, e, portanto, existência de contato entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta (flanco) em instantes anteriores ao início do corte.

Segundo Malekian et al. (2012), o início do corte, e consequente formação de cavaco, ocorre apenas depois da ferramenta penetrar certa espessura no material da peça, conforme apresentado na Figura 11. Desta forma, antes de se atingir esta espessura mínima, o material da peça é apenas deformado, ou sulcado, sem remoção de material.

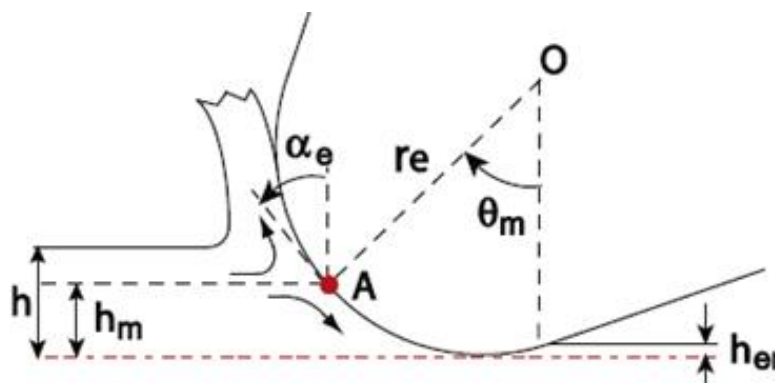


Figura 11 – Representação esquemática da espessura mínima de penetração para corte e da formação do cavaco

Fonte: Malekian et al., 2012.

Assim, o processo de formação e fluxo de cavaco não é contribuído pela Força Residual, porém, devido à existência de movimento relativo entre a ferramenta e a peça, a Força Residual está relacionada à existência de atrito na região da superfície de folga da ferramenta (STEVENSON, 1998).

Na prática, o método empregado para a determinação numérica desta força é o da extrapolação a zero. Segundo Silva (2014), o método consiste na medição das forças de corte para várias espessuras indeformadas de cavaco. Posteriormente se extrapola esses dados para a espessura indeformada igual a zero, e o valor obtido é admitido como o da Força Residual.

Silva (2008) obteve pelo método da extrapolação a zero que a força residual na usinagem a seco do aço ABNT 1045 com ferramenta de aço rápido se encontra entre 46N e 52N, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13.

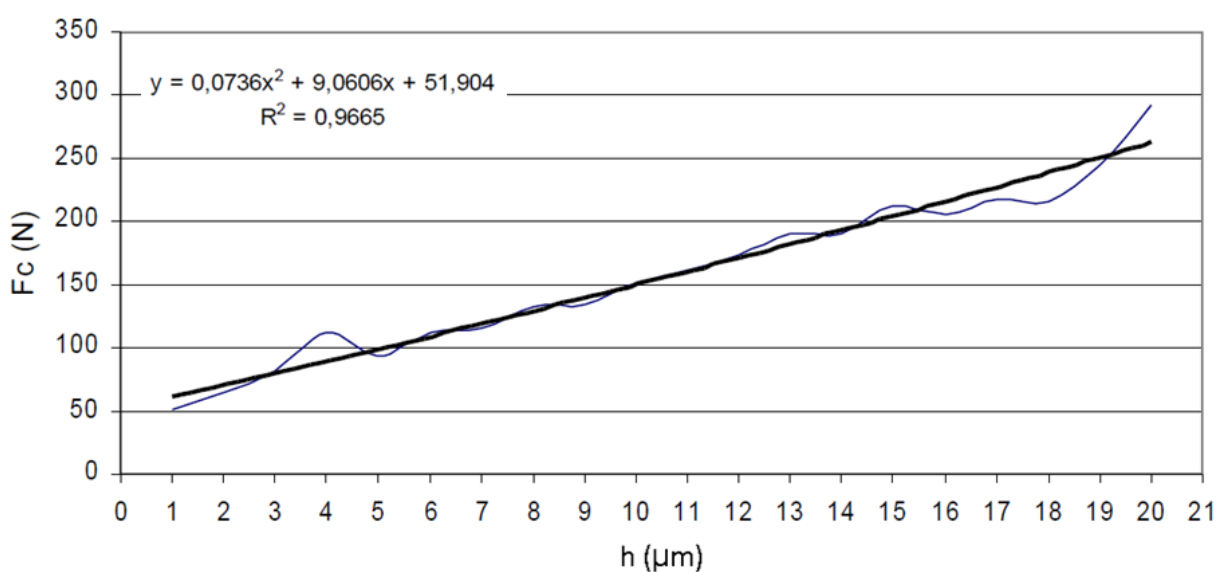


Figura 12 – Determinação da Força Residual através do método da extrapolação a zero na usinagem a seco do aço ABNT 1045 com ferramenta de aço rápido – Ensaio Crescente
Fonte: adaptado de Silva, 2008.

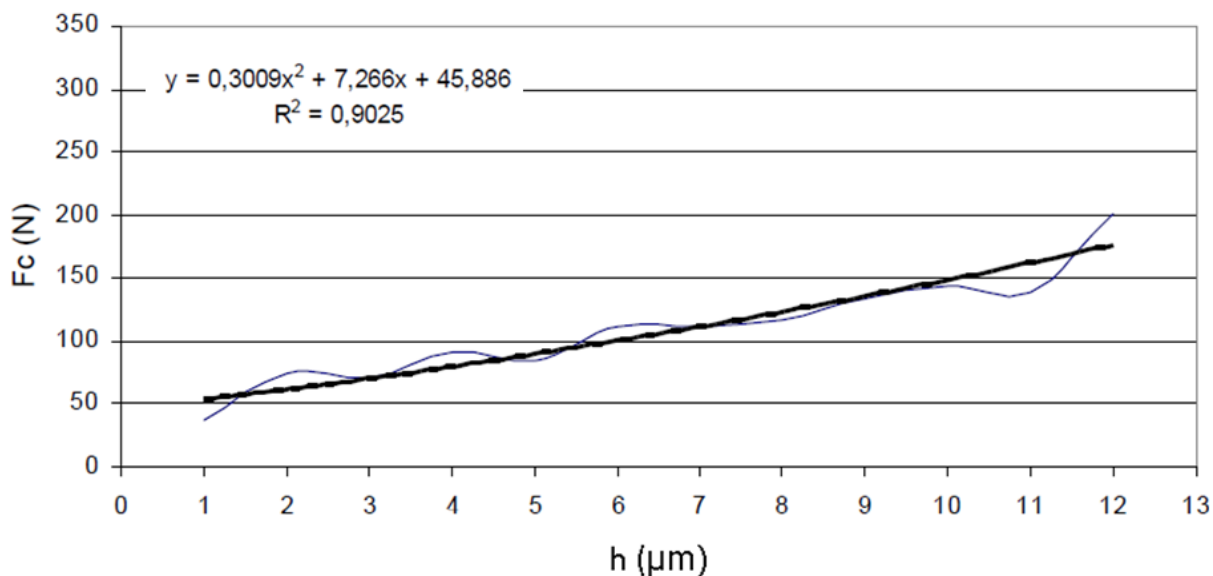


Figura 13 – Determinação da Força Residual através do método da extrapolação a zero na usinagem a seco do aço ABNT 1045 com ferramenta de aço rápido – Ensaio Decrescente
 Fonte: adaptado de Silva, 2008.

Mais tarde, Silva (2014) obteve que a Força Residual, também para a usinagem a seco do aço ABNT 1045 com ferramenta de aço rápido, era de 42N, conforme apresentado na Figura 14.

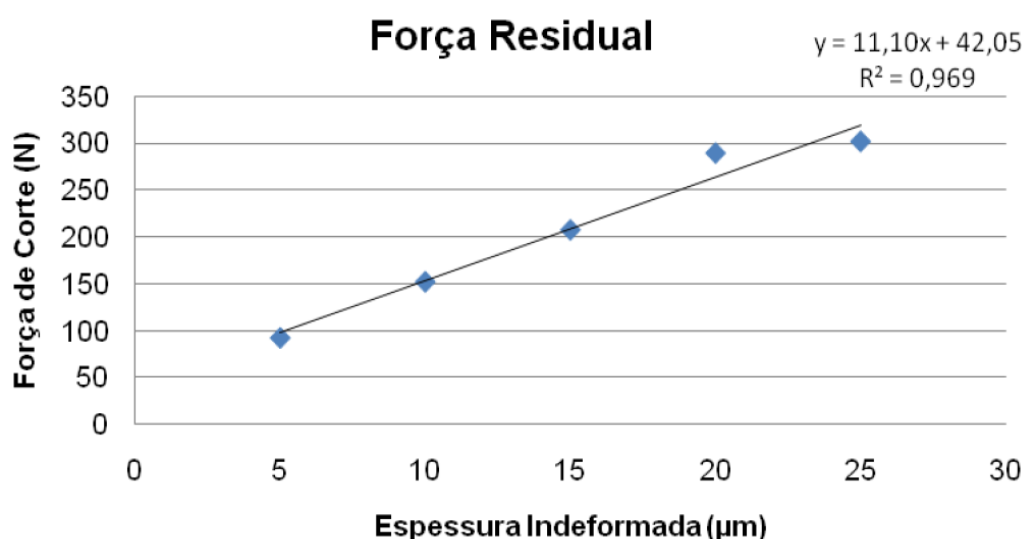


Figura 14 – Determinação da Força Residual através do método da extrapolação a zero na usinagem a seco do aço ABNT 1045 com ferramenta de aço rápido
 Fonte: Silva, 2014.

2.8 ATRITO EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO

No processo de torneamento, o fenômeno do atrito se encontra presente em duas regiões da ferramenta de corte: na zona de corte secundária e na zona de corte terciária, conforme representadas na Figura 15 (ABDELMONEIN, 1979).

Desta forma, o atrito na zona de corte secundária se deve ao contato entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco, enquanto na zona terciária se deve ao contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça usinada (ABDELMONEIN, 1979).

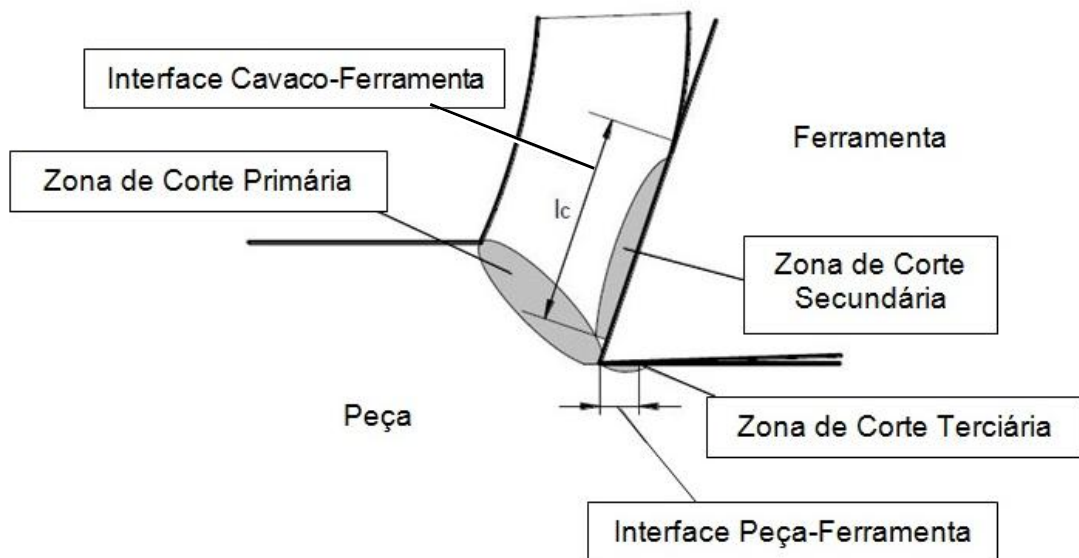


Figura 15 – Regiões de atrito no processo de torneamento

Fonte: adaptado de Cangundo, 2009.

Ainda, a zona de corte secundária apresenta uma particularidade. Durante o contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, existem duas regiões distintas: a zona de aderência e a zona de escorregamento, conforme apresentado na Figura 16.

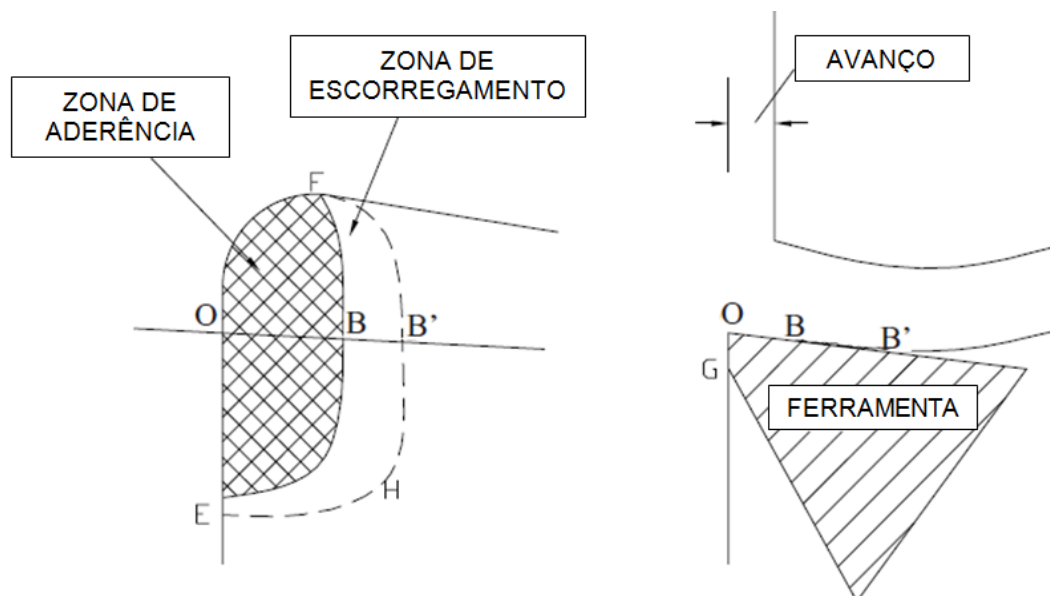


Figura 16 – Zonas de aderência e de escorregamento

Fonte: adaptado de Trent; Wright, 2000.

Na primeira se verifica o fenômeno de aderência do cavaco na superfície da ferramenta, devido às elevadas pressões. Com o escoamento do cavaco, as pressões são gradualmente reduzidas ao longo da interface, e o fenômeno de aderência deixa de existir. Inicia-se, portanto, a segunda região, na qual o cavaco desliza sobre a superfície da ferramenta (ABDELMONEIN, 1979) (CERVELIN, 2009).

2.9 FALHAS E FIM DE VIDA EM FERRAMENTAS DE CORTE

A vida de uma ferramenta de corte é definida como o tempo efetivo de trabalho dentro de critérios estabelecidos, sendo o fim de vida atingido quando a ferramenta falha, perdendo a sua capacidade de corte e necessitando de reafiação ou substituição. Estas falhas, por sua vez, podem ocorrer sob duas formas: acidental e convencional (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (STEMMER, 2007) (FERRARESI, 1977).

Assim, as falhas acidentais, também denominadas de falhas catastróficas, ocorrem prematuramente devido às excessivas solicitações térmicas e mecânicas, como impactos, vibrações e choques térmicos. Os principais tipos de falhas acidentais citados pela literatura são: quebras, trincas, sulcos e deformações

plásticas (STEMMER, 2007) (AMORIM, 2002) (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (FERRARESI, 1977).

Em contrapartida, a falha convencional é causada pelo desgaste da ferramenta, o qual é tratado como um processo responsável por perda de material da ferramenta, mas de forma convencional, gradual e inerente aos processos de usinagem, como o torneamento, e aos materiais em operação (ESPANHOL, 2008) (MIRANDA, 2010). Nesse sentido, todos os materiais de ferramentas estão sujeitos a desgaste (STEMMER, 2007).

2.9.1 Tipos de Desgaste em Ferramentas de Corte

De acordo com a literatura, três são os tipos de desgaste observados em ferramentas de corte: desgaste de flanco, de cratera e de entalhe (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (STEMMER, 2007) (AMORIM, 2002).

O desgaste de flanco é o tipo mais comum. Ocorre na superfície de folga da ferramenta de corte devido aos mecanismos de desgaste por adesão e abrasão. Em decorrência, o processo de usinagem exige maiores potências de corte e apresenta maior vibração no par ferramenta-peça, prejudicando as tolerâncias e o acabamento das peças usinadas. Um fator que contribui para sua ocorrência é o aumento da velocidade de corte (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (AMORIM, 2002).

O desgaste de cratera, por sua vez, é causado pelo atrito na superfície de saída da ferramenta de corte, favorecido pelos mecanismos de desgaste por difusão e abrasão. Quando combinado com o desgaste de flanco, pode resultar na quebra da ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (AMORIM, 2002).

Por fim, o desgaste de entalhe é considerado como um caso particular e mais profundo do desgaste de flanco. Ocorre, portanto, na região mais extrema do contato entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (AMORIM, 2002). No entanto, segundo Bonandi (2002), esse tipo de desgaste pode também ocorrer na superfície de saída da ferramenta. De modo geral, sua ocorrência está relacionada ao mecanismo de desgaste por adesão e oxidação.

2.9.2 Mecanismos de Desgaste

São considerados mecanismos de desgaste os fenômenos físicos ou químicos que levam à ocorrência dos tipos de desgaste descritos anteriormente. Segundo Amorim (2002), o conhecimento de tais mecanismos é importante para o desenvolvimento de tecnologias a fim de evitá-los ou minimizá-los, de modo a aumentar a vida útil da ferramenta de corte.

A literatura separa os mecanismos de desgaste e os apresenta de forma isolada. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001) e Amorim (2002), os mecanismos são: adesão, abrasão, difusão, oxidação e fadiga superficial. Entretanto, para Zum Gahr (1987), que cita a norma DIN 50320, quatro são os mecanismos: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica.

2.9.2.1 Adesão

O mecanismo de desgaste por adesão está relacionado ao contato entre duas superfícies em condições de elevada pressão localizada, a qual proporciona deformação plástica e junção das asperezas. Quando há movimento relativo entre as superfícies, tais junções se rompem, havendo transferência de material entre as superfícies. A severidade deste mecanismo está relacionada às propriedades dos materiais em contato, à pressão e às condições superficiais, como a rugosidade e a presença de contaminantes (ZUM GAHR, 1987).

No caso de processos de torneamento, há a ocorrência desta espécie de soldagem principalmente entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (NOUARI et al., 2005). O desgaste, portanto, decorre do processo de separação dessas duas superfícies. Além disso, este mecanismo está relacionado com a formação da Aresta Postiça de Corte, a qual também apresenta significativa influência no desgaste de ferramentas, principalmente no desgaste de flanco (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

2.9.2.2 Abrasão

O mecanismo de desgaste por abrasão está relacionado tanto ao movimento relativo entre as superfícies quanto à presença de protuberâncias ou

partículas com elevada dureza. Estas podem estar soltas entre as superfícies ou então aderidas a elas (ZUM GAHR, 1987).

Deste modo, o mecanismo pode ser classificado em desgaste a dois ou a três corpos. O primeiro ocorre quando as partículas de elevada dureza estão aderidas ou fazem parte de uma das superfícies em contato (protuberâncias), e o movimento relativo entre as superfícies se dá por deslizamento puro. (ZUM GAHR, 1987) (MARINESCU et al, 2004). O segundo, por sua vez, ocorre quando as partículas estão livres sobre as superfícies em contato, de forma a haver rotação e deslizamento, causando menor desgaste abrasivo que o mecanismo a dois corpos (ZUM GAHR, 1987) (MARINESCU et al, 2004).

No processo de torneamento, portanto, o mecanismo de desgaste por abrasão está relacionado tanto ao movimento relativo entre a ferramenta (superfície de folga ou de saída) e a peça ou o cavaco, quanto à presença de partículas com elevada dureza, que causam a perda de material. Além disso, o mecanismo é favorecido pela temperatura de corte, a qual reduz a dureza das ferramentas. (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (AMORIM, 2002) (MOTA, 2006).

2.9.2.3 Difusão

O mecanismo de desgaste por difusão está relacionado, basicamente, a três fatores: temperatura, tempo de contato e afinidade físico-química entre os materiais em contato, no caso do torneamento, os materiais da peça e da ferramenta. Além disso, este fenômeno se intensifica em condições que elevem a temperatura do processo, como cortes a altas velocidades e grandes avanços (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (AMORIM, 2002).

2.9.2.4 Oxidação

O mecanismo de desgaste por oxidação, ou triboquímico, caracteriza-se pelo contato entre superfícies que reagem com o meio a que estão expostas. Assim, na existência de movimento relativo, há uma contínua formação e remoção dessas camadas, caracterizando o desgaste (ZUM GAHR, 1987).

No processo de torneamento, o mecanismo de desgaste por oxidação está relacionado à presença de ar ou água na superfície da ferramenta durante o

processo de usinagem, sendo favorecido pelas altas temperaturas atingidas durante o processo (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001) (MOTA, 2006) (MIRANDA, 2010). Assim, decorrente de reação entre o material da ferramenta e o meio, há durante o corte a formação de uma película de óxido na superfície, a qual é subsequentemente removida pelo atrito entre a ferramenta e a peça ou a ferramenta e o cavaco (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001)

2.9.2.5 Fadiga Superficial

O mecanismo de desgaste por fadiga está relacionado com a ocorrência de repetitivos carregamentos térmicos ou mecânicos. Desta forma, podem ocorrer a nível microscópico devido a carregamentos cíclicos nas asperezas das superfícies em contato e em movimento relativo (ZUM GAHR, 1987).

Na usinagem, o mecanismo ocorre com maior frequência em processos de corte interrompido ou de forças instáveis, podendo também ocorrer devido às forças normal e de atrito na região de contato. No entanto, torna-se importante apenas em situações onde os mecanismos de abrasão e adesão são de baixa intensidade. Este mecanismo pode ser caracterizado por formação de trincas na superfície ou próxima a ela (AMORIM, 2002) (ZUM GAHR, 1987).

Embora os mecanismos sejam apresentados de forma isolada, Zum Gahr (1987) destaca que na prática são muitos os processos influenciados simultaneamente por mais de um mecanismo de desgaste. Ainda, Diniz, Marcondes e Coppini (2001) apontam para a grande dificuldade de se definir qual a contribuição isolada de cada mecanismo para os processos de usinagem como o torneamento.

Porém, nesse sentido se destaca a existência de quadros e diagramas qualitativos que apresentam visualmente a influência e importância de cada mecanismo em função de parâmetros ou, ainda, grandezas mensuráveis que influenciam o processo. A Figura 17, por exemplo, apresenta a relação entre os mecanismos de desgaste predominantes na ferramenta de corte em relação à temperatura atingida durante o processo.

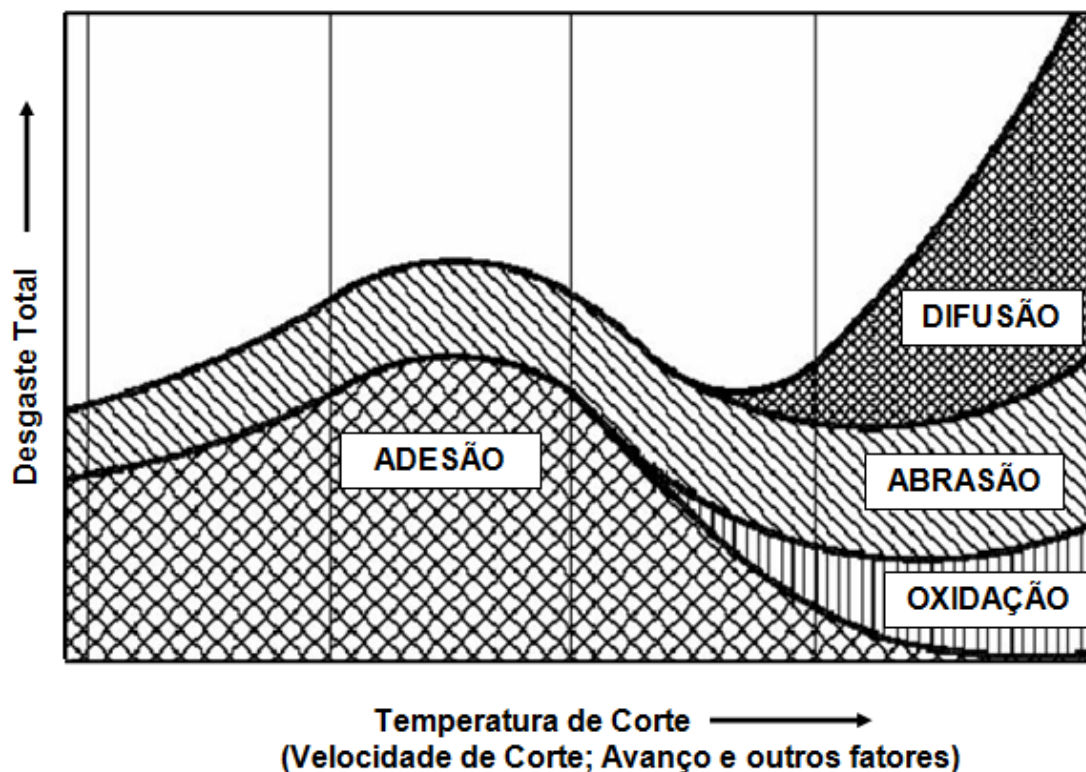


Figura 17 – Diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte
 Fonte: adaptado de Vieregge, 1970 (apud MOTA, 2006).

Através desses quadros e diagramas é possível de se obter informações relevantes sobre os mecanismos de desgaste atuantes na ferramenta em determinada condição de usinagem. Por exemplo, em baixas velocidades de corte, e, portanto baixas temperaturas, o desgaste se deve à adesão e abrasão. No entanto, com o aumento da velocidade e, conseqüentemente da temperatura, também há influência de mecanismos como a difusão e a oxidação, cujas intensidades dependem muito da temperatura (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

2.9.3 Desgaste em Ferramentas de Aço Rápido

As ferramentas de aço rápido, pelas suas propriedades e faixas de operação em processo, convencionalmente são atingidas apenas pelos mecanismos de desgaste por abrasão e adesão. Desta forma, mecanismos de desgaste por difusão e oxidação não são relevantes, haja vista que a temperatura para ocorrerem encontra-se acima daquela na qual o aço rápido amolece (DEMATTE, 2006). Assim, ferramentas confeccionadas em aço rápido comumente têm sua falha determinada

pelo excessivo desgaste de flanco, e não pelos desgastes de cratera ou de entalhe. Segundo Nogueira (2004), a determinação do fim de vida para as ferramentas de aço rápido é apresentada pela norma ISO 3685, a qual estabelece os seguintes critérios: desgaste de flanco médio (VB), desgaste de flanco máximo ($VB_{m\acute{a}x}$) e a falha catastrófica, representados esquematicamente na Figura 18.

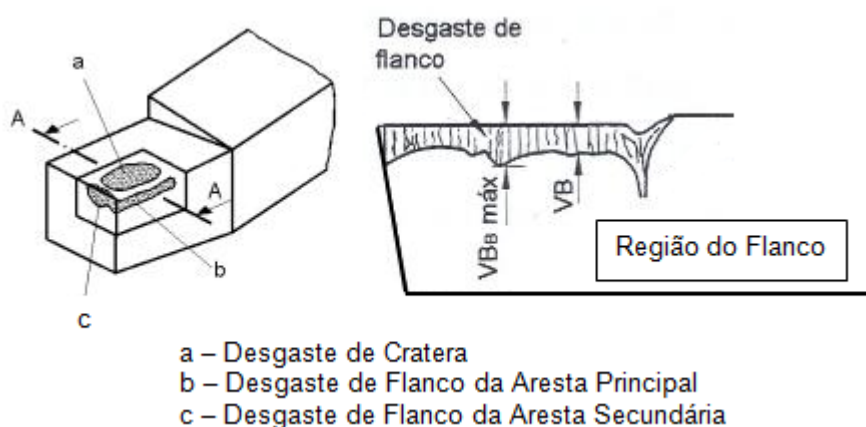


Figura 18 – Representação esquemática dos critérios de fim de vida para ferramentas de aço rápido

Fonte: adaptado de ISO 3685, 1977 (apud NOGUEIRA, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A etapa experimental deste trabalho pode ser dividida em quatro grandes itens: preparação das amostras; estudo do sistema de aquisição e monitoramento de dados; desenvolvimento dos suportes de fixação; e avaliação do dispositivo.

Desta forma, denominou-se de dispositivo o conjunto formado pelos suportes de fixação (da plataforma piezelétrica no torno e da amostra na plataforma piezelétrica) e o sistema de aquisição de dados.

3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preparação das amostras seguiu as etapas apresentadas na Figura 19, assim como as condições e os parâmetros utilizados pelos trabalhos anteriormente desenvolvidos na universidade por Dos Anjos, Iha e Fernandes (2009) e Seika e Kowalski (2014).

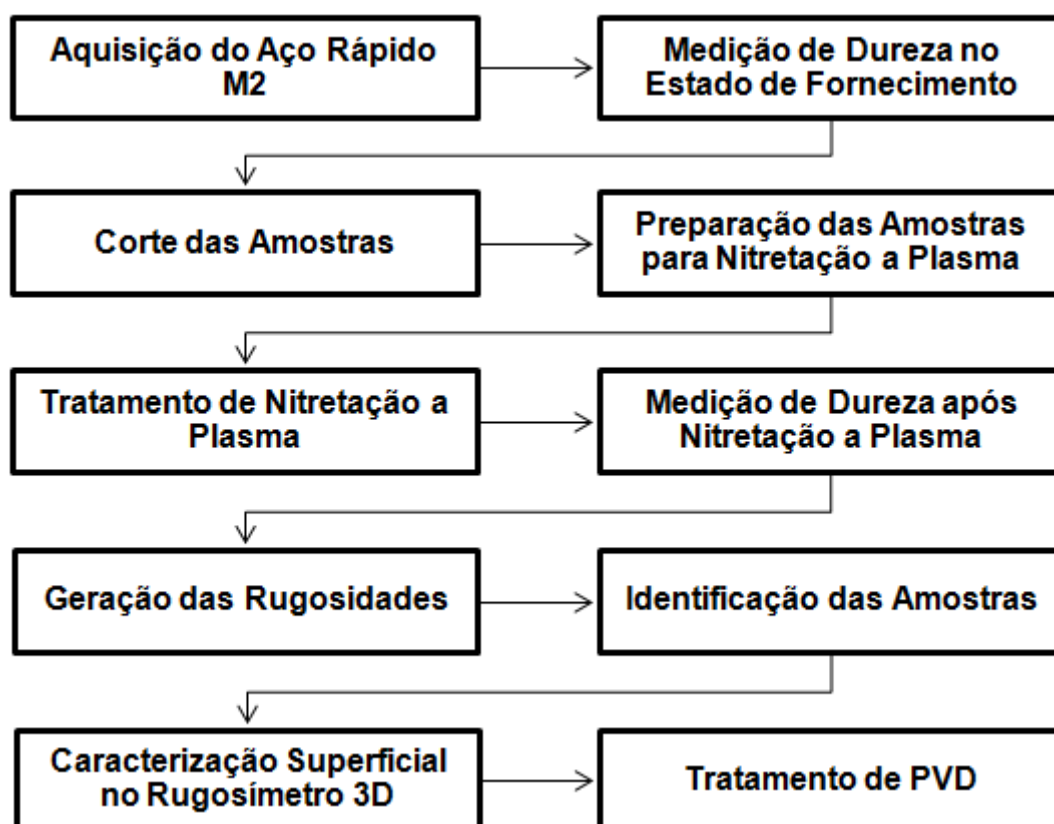


Figura 19 – Etapas de preparação das amostras

Fonte: Autoria Própria.

3.1.1 Aquisição do Aço Rápido M2

Inicialmente foram adquiridas cinco barras de aço rápido M2 (*bits*) sem adição de cobalto, no estado temperado e revenido, de um mesmo lote da marca ADES fabricado pela empresa Sperafico & Cia Ltda. Os *bits* tinham seção quadrada de 5/16 x 4 polegadas (aproximadamente 7,94 x 101,60 mm), e estão apresentados na Figura 20.



Figura 20 – Bits de aço rápido M2 e regiões de medição de dureza

Fonte: Autoria Própria.

3.1.2 Medição de Dureza no Estado de Fornecimento

A fim de se avaliar os *bits* adquiridos, realizou-se o ensaio de dureza Vickers (HV 20/10). Para tanto, utilizou-se o durômetro EncoTest M4C/R G3, do Laboratório de Materiais da UTFPR, no qual foram realizadas nove medições em cada *bit*, sendo três em cada extremidade e três na região central, conforme indicado na Figura 20. A média e o desvio padrão dos valores obtidos para a dureza dos *bits* estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Média e desvio padrão dos valores de dureza para os *bits* no estado de fornecimento

Bits	Número de medições em cada bit	Média	Desvio Padrão
5	9	927,47 HV 20/10	7,62 HV 20/10

Fonte: Autoria Própria.

3.1.3 Corte das Amostras

Devido às condições que as amostras seriam submetidas durante os ensaios de validação do dispositivo, houve a necessidade de reduzir o comprimento

e também a seção dos *bits*. Define-se aqui, que amostra é cada uma das extremidades das partes originadas do processo de corte do *bit*, e que o padrão adotado para as dimensões seria aquele apresentado nas Figuras 21 e 22.

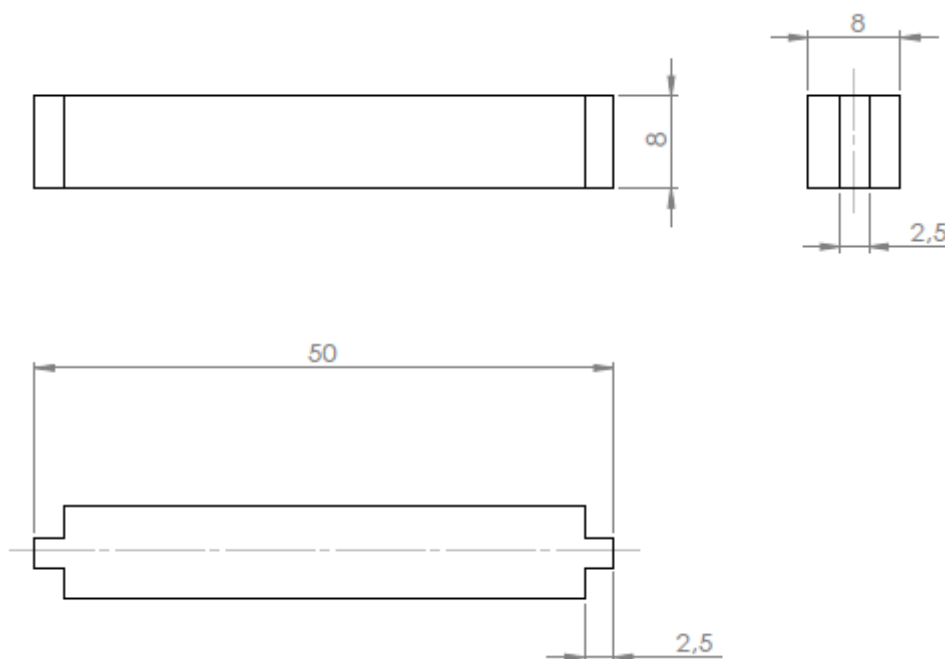


Figura 21 – Dimensões das amostras

Fonte: Autoria Própria.

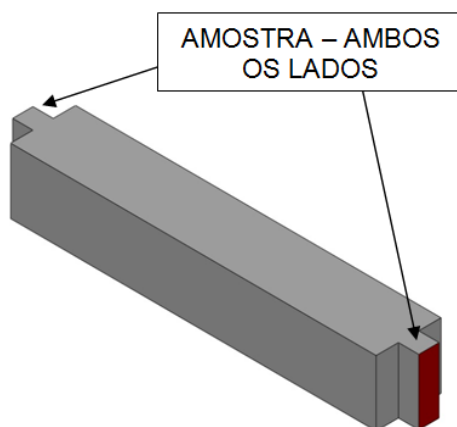


Figura 22 – Representação da amostra

Fonte: Autoria Própria.

Visando eliminar ou ao menos reduzir as modificações microestruturais e demais distorções causadas pela geração de calor nos processos convencionais de corte, optou-se pelo corte a jato d'água, o qual foi realizado na empresa Aquacort.

3.1.4 Preparação das Amostras para Nitretação a Plasma

A fim de equiparar todas as amostras e eliminar possíveis distorções e desvios geométricos oriundos do processo de corte a jato d'água, realizou-se a uniformização superficial das mesmas, as quais foram submetidas ao processo de lixamento em granulometria 600.

Na sequência foi realizada a limpeza das amostras pelo processo de agitação ultrassônica. Tal procedimento durou trinta minutos, sendo seguido pelo processo de secagem. Estas etapas foram realizadas nos equipamentos da marca Struers, modelo Metason 60T e Drybox-2 respectivamente, ambos do Laboratório de Materiais da UTFPR.

3.1.5 Tratamento de Nitretação a Plasma

O tratamento de nitretação a plasma foi realizado no Laboratório de Plasma da UTFPR, cujo reator é apresentado nas Figuras 23 e 24.

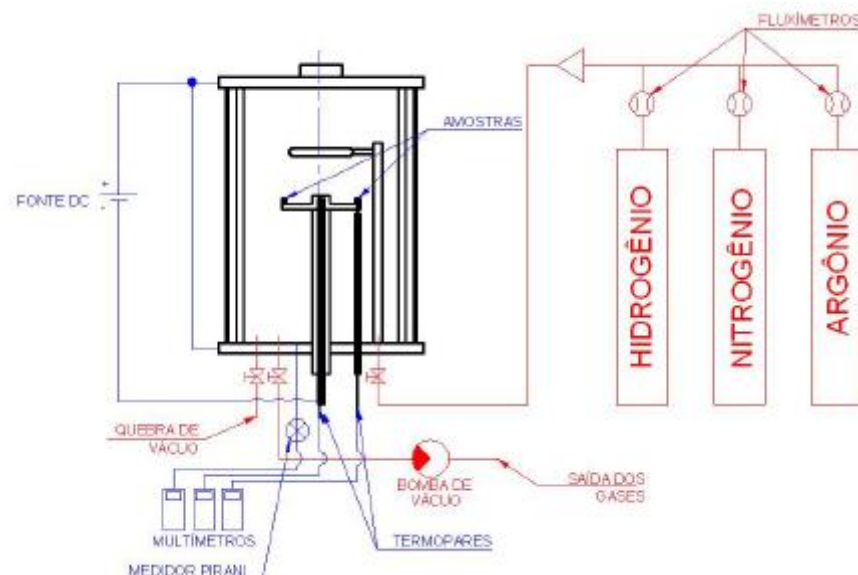


Figura 23 – Representação esquemática do reator do Laboratório de Plasma da UTFPR

Fonte: Dos Anjos, Iha e Fernandes (2009).



Figura 24 – Reator do Laboratório de Plasma da UTFPR

Fonte: Autoria Própria.

As condições do tratamento seguiram aquelas utilizadas no trabalho de Seika e Kowalski (2014), as quais evitam a formação da camada branca (camada de compostos) na superfície das amostras. As etapas do processo são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Etapas realizadas durante o processo de nitretação a plasma

Etapa	Processo	Descrição
1	Ciclo Padrão de Limpeza	As amostras foram mantidas em atmosfera de hidrogênio (H ₂) durante trinta minutos
2	Introdução de Gás Argônio	Fluxo: 160 sccm Ar + 40 sccm H ₂ Pressão: 4 Torr Condição mantida até a temperatura atingir 500 °C
3	Introdução de Gás Nitrogênio	Fluxo: 20 sccm N ₂ + 144 sccm Ar + 36 sccm H ₂ Pressão: 3 Torr Condição mantida durante duas horas
4	Resfriamento em Atmosfera de Hidrogênio (H ₂)	Fluxo: 36 sccm H ₂ Condição mantida até a temperatura atingir 150 °C
5	Resfriamento Final	Sem fluxo de H ₂ Condição mantida até a temperatura ambiente

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 25 apresenta as amostras durante a terceira etapa do tratamento de nitretação a plasma.

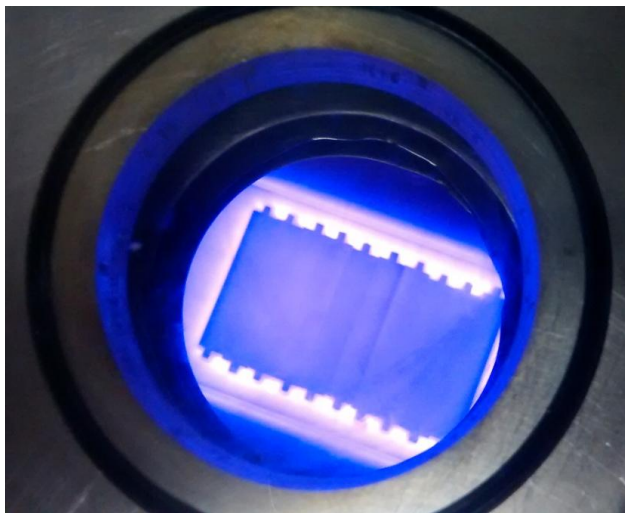


Figura 25 – Amostras durante o processo de nitretação a plasma

Fonte: Autoria Própria.

3.1.6 Medição de Dureza após o Tratamento de Nitretação a Plasma

Após o tratamento de nitretação a plasma, realizou-se nova medição de dureza Vickers (HV 3/3 e HV 20/10) nas amostras, utilizando o durômetro EncoTest M4C/R G3, do Laboratório de Materiais da UTFPR. Desta vez, no entanto, foram selecionadas apenas três amostras. Em cada uma foram realizadas seis medições de dureza, três na face nitretada e três na face não nitretada (em contato com o suporte do reator durante a nitretação a plasma).

As médias e os desvios padrões dessas medições são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Dureza Vickers HV 20/10 após a nitretação a plasma

	Face Nitretada	Face Não Nitretada
Dureza Média	1253,89	887,78
Desvio Padrão	13,65	10,88

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 6 – Dureza Vickers HV 3/3 após a nitretação a plasma

	Face Nitretada	Face Não Nitretada
Dureza Média	1247	889,67
Desvio Padrão	20,71	11,01

Fonte: Aatoria Própria.

Observa-se um decréscimo nos valores de dureza da região não nitretada, quando comparado com o estado de fornecimento – Tabela 03, página 41. Este fenômeno, segundo Dos Anjos, Iha e Fernandes (2009), pode ser explicado pelo tempo e temperatura do tratamento de nitretação a plasma, o qual se assemelha a um tratamento de revenido nas regiões não nitretadas.

Além disso, assim como nos trabalhos de Dos Anjos, Iha e Fernandes (2009) e Seika e Kowalski (2014), as superfícies nitretadas tiveram um acréscimo considerável na dureza, atingindo o patamar de 1250 HV.

3.1.7 Geração de Rugosidades

De acordo com Seika e Kowalski (2014), o tratamento de nitretação a plasma altera a rugosidade superficial. Assim, novamente a fim de se padronizar e uniformizar as condições de rugosidade, todas as amostras foram inicialmente lixadas na granulometria 600. Deste modo, cada uma foi deslocada sobre a lixa num percurso total de aproximadamente um metro. Este processo foi realizado de forma manual com um suporte fabricado para aumentar a estabilidade das amostras durante o lixamento e o polimento. Este suporte é apresentado na Figura 26.

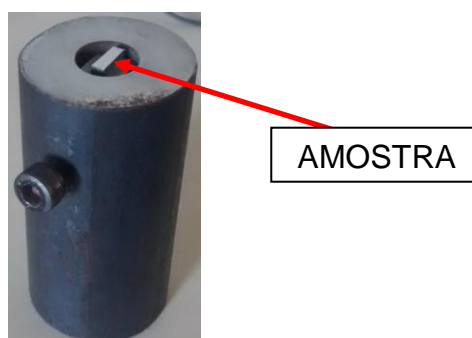


Figura 26 – Suporte para as amostras

Fonte: Aatoria Própria.

Em seguida, a fim de se obter superfícies com valores de rugosidade distintos, as amostras foram separadas em três grupos, os quais foram submetidos à preparação em diferentes granulometrias, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Separação das amostras para a geração de rugosidade

Grupo de Rugosidade	Processo	Granulometria	Parâmetros
1	Lixamento	220	Percurso total de um metro
2	Lixamento	600	Percurso total de um metro
3	Polimento	Etapa 1: Pasta diamantada de 3 μm Etapa 2: Pasta diamantada de 1 μm	Tempo de polimento de dois minutos em cada etapa

Fonte: Autoria Própria.

Todos os processos foram realizados com o auxílio do suporte apresentado anteriormente. Os processos de lixamento foram realizados de forma manual, sem a utilização da lixadeira rotativa, enquanto o polimento foi realizado manualmente na politriz rotativa.

3.1.8 Identificação das Amostras

Para controle durante as etapas seguintes de preparação, principalmente após o tratamento de PVD, as amostras foram identificadas através de um número e do grupo de rugosidade. Para tanto, as amostras foram submetidas à indentação Rockwell C, conforme exemplificado na Figura 27 e apresentado na Tabela 8.



Figura 27 – Marcações realizadas para identificação: do número da amostra, em vermelho; e do grupo de rugosidade em azul

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 – Sistema de identificação das amostras

Grupo de Rugosidade	Quantidade de Indentações na Região Central da Amostra
1	2
2	1
3	0
Amostra	Quantidade de Indentações na Extremidade da Amostra
1	1
2	2
3	3
As amostras 4, 5 e 6 foram definidas como aquelas opostas às amostras 1, 2 e 3 respectivamente, não sendo, portanto, indentadas.	

Fonte: Autoria Própria.

3.1.9 Caracterização Superficial no Rugosímetro 3D

As amostras, previamente limpas pelo processo de agitação ultrassônica, foram encaminhadas ao rugosímetro 3D da marca Taylor Hobson modelo Talysurf CCI Lite, para caracterização da superfície quanto à rugosidade. Este processo é realizado com o auxílio do *software* TalyMap Platinum 6.1.0.6001.

Em cada amostra foram realizadas duas medições, sendo uma acima da linha média e outra abaixo, conforme representação na Figura 28.

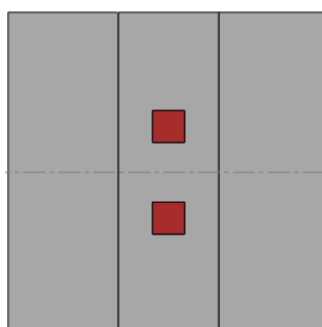


Figura 28 – Pontos de medição

Fonte: Autoria Própria.

Foram utilizados para a caracterização superficial, os seguintes parâmetros de amplitude: Média Aritmética da Rugosidade (Sa) e Desvio Quadrático Médio (Sq), de acordo com a norma ISO 25178-2:2012. A partir das medições foram calculados a média e o desvio padrão, além de se estabelecer os limites do intervalo de confiança de 95% (utilizando o coeficiente t de Student) conforme as equações (13) e (14).

$$\text{Limite Inferior} = \bar{x} - \frac{t * s}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

$$\text{Limite Superior} = \bar{x} + \frac{t * s}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

Onde 'x' é a média aritmética amostral, 't' é o coeficiente de Student, 's' é o desvio padrão amostral e 'n' é o tamanho da amostra.

São apresentados a seguir, os valores calculados para a média e os limites do intervalo de confiança para a média dos parâmetros Sa (Média Aritmética da Rugosidade) e Sq (Desvio Quadrático Médio).

Tabela 9 – Valores do parâmetro Sa de rugosidade para as amostras nitretadas

Amostras	Média (µm)	Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a Média (µm)	Limite Superior do Intervalo de Confiança para a Média (µm)
220	1,1091	1,0328	1,1854
600	0,0918	0,0737	0,1099
Polida	0,0373	0,0292	0,0454

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 – Valores do parâmetro Sq de rugosidade para as amostras nitretadas

Amostras	Média (µm)	Limite Inferior do Intervalo de Confiança para a Média (µm)	Limite Superior do Intervalo de Confiança para a Média (µm)
220	1,4043	1,3038	1,5047
600	0,1298	0,1046	0,1550
Polida	0,0603	0,0485	0,0720

Fonte: Autoria Própria.

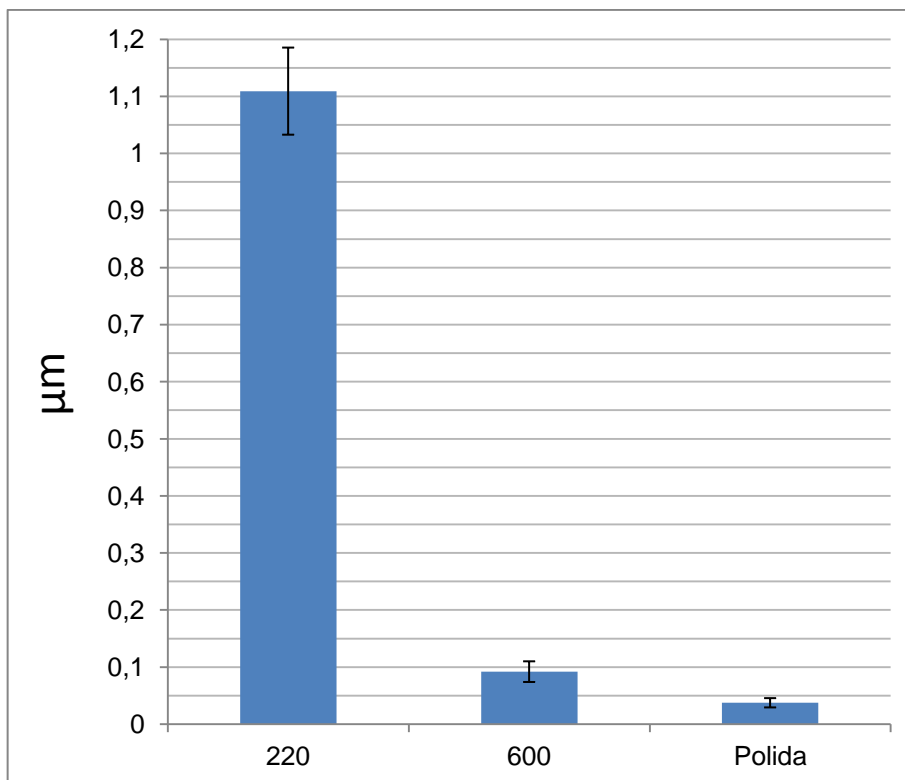


Gráfico 01 – Valores do parâmetro Sa de rugosidade para as amostras nitretadas
Fonte: Autoria Própria.

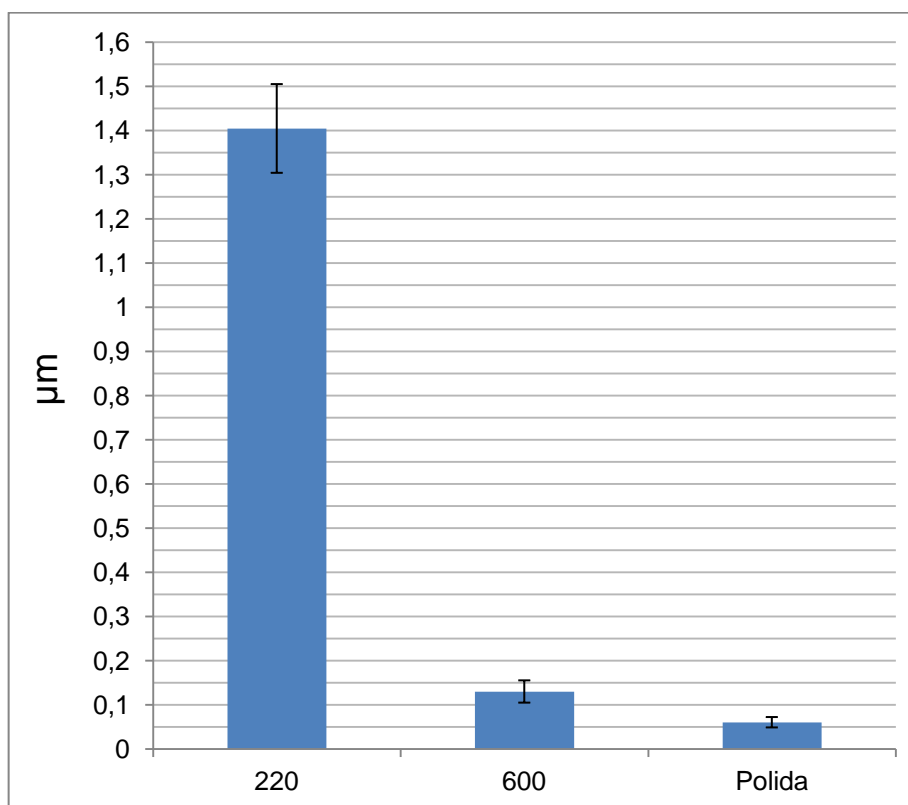


Gráfico 02 – Valores do parâmetro Sq de rugosidade para as amostras nitretadas
Fonte: Autoria Própria.

A partir dos dados apresentados se observa que os intervalos de confiança não se interceptam entre si, de forma a indicar que as amostras possuem valores de rugosidade concentrados em níveis diferentes.

3.1.10 Tratamento de Deposição Física a Vapor (PVD)

Após o processo de caracterização superficial quanto à rugosidade, as amostras foram encaminhadas para o tratamento de Deposição Física a Vapor, no qual receberam a camada de espessura 3 μm de nitreto de titânio (TiN). Este tratamento foi realizado na empresa Platit, a qual nomeia o tratamento por PlaTiN. Maiores informações quanto aos parâmetros do tratamento não são divulgados pela empresa.

3.2. ESTUDO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E MONITORAMENTO DE DADOS

Foi definido que durante a execução dos ensaios, a aquisição e o monitoramento dos dados seriam realizados através do sistema composto pelos seguintes equipamentos: plataforma piezelétrica da marca Kistler modelo 9257B, aquisitor/conversor de sinais da marca National Instruments modelo USB-6259 BNC e amplificador da marca National Instruments modelo Type 5070A, e seus respectivos cabos, todos de propriedade da universidade.

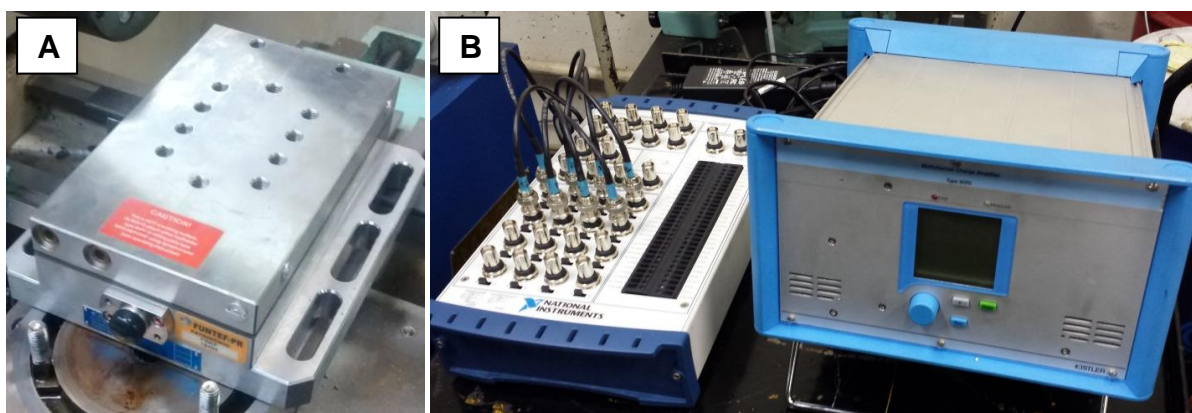


Figura 29 – (A) Plataforma piezelétrica e (B) aquisitor/conversor de sinais (esquerda) e amplificador (direita)

Fonte: Autoria Própria.

Com estes equipamentos apropriadamente posicionados, conectou-se o cabo responsável pela comunicação entre o a plataforma piezelétrica e o amplificador de sinais, e o cabo que conecta o amplificador ao aqisitor/conversor de sinais. Este cabo é disposto de tal forma que existe apenas uma entrada (engate no amplificador) e oito saídas (engate no aqisitor/conversor de sinais), conforme apresentado na Figura 30.



Figura 30 – Conexões dos cabos (1 a 8) no aqisitor/conversor de sinais
Fonte: Autoria Própria.

Cada uma destas saídas é responsável pela aquisição e monitoramento de uma componente de força ou então de uma componente de momento, considerando um sistema de coordenadas cartesiano com eixos x, y e z, conforme Figura 31.

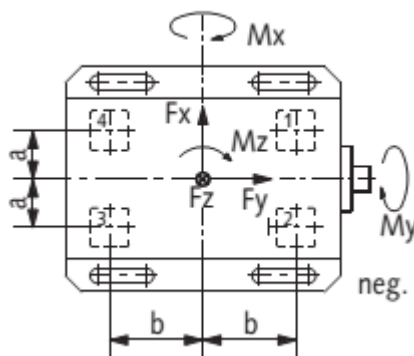


Figura 31 – Orientação dos eixos na plataforma piezelétrica
Fonte: Kistler.

Assim, para identificar os eixos de interesse, utilizou-se o software LabVIEW SignalExpress 3.0 – fornecido pela UTFPR – para monitorar variações em cada um dos canais.

Através de testes manuais (aplicação de força em diversos sentidos), identificou-se os cabos de números 2 e 3 como sendo aqueles responsáveis pela aquisição de sinais nos eixos y e z da plataforma. São estes os eixos correspondentes às forças normal e de atrito, respectivamente, ao se utilizar do dispositivo desenvolvido para ensaios de desgaste.

Após a identificação dos eixos de interesse, todos os experimentos realizados foram monitorados e apropriadamente catalogados através do software LabVIEW SignalExpress, cuja interface gráfica é apresentada na Figura 32.

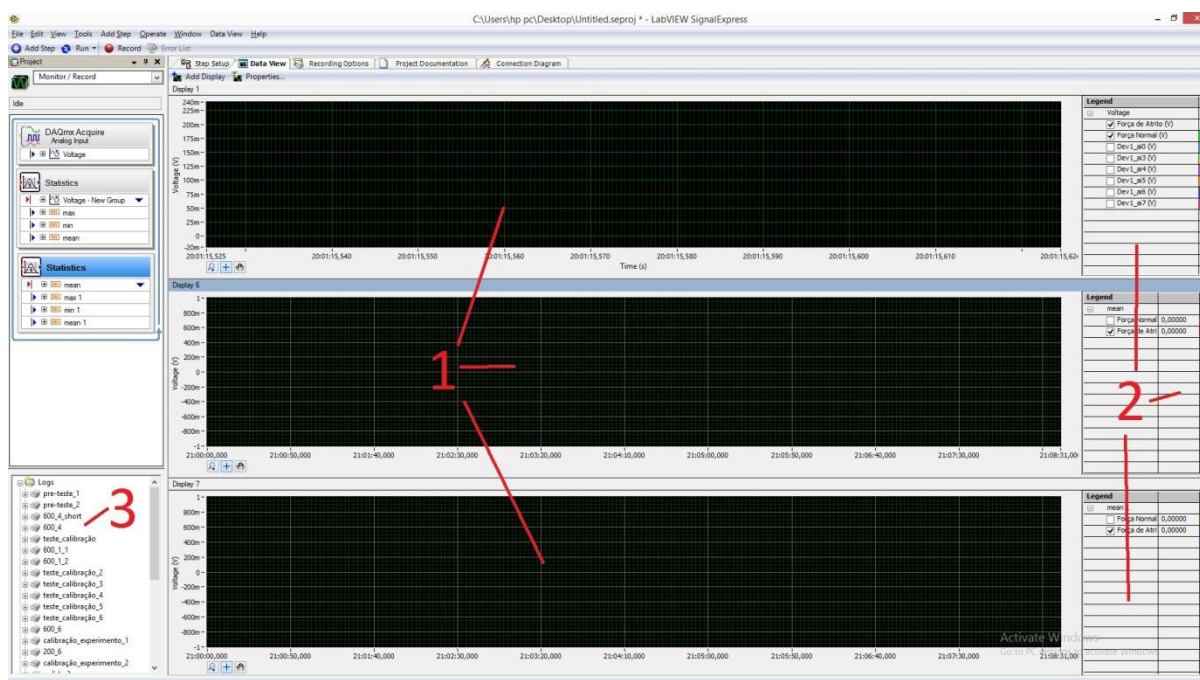


Figura 32 – Interface gráfica do LabVIEW Signal Express: 1 – Displays responsáveis pelo monitoramento ao vivo dos canais selecionados; 2 – Legendas e controle de exibição de canais; 3 – Lista de gravações

Fonte: Autoria Própria.

Ao se monitorar a força de atrito durante os diversos pré-testes realizados, observou-se que havia sempre um erro associado às medições de força no eixo z. Este erro se mostrou cumulativo e com taxa de crescimento aproximadamente constante. Assim, qualquer medição no eixo em questão é

afetada, e seus resultados são incrementados a uma taxa aproximada de 0,0003 Volts por segundo (equivalente a 0,03 N/s) como se pode observar na Figura 33.

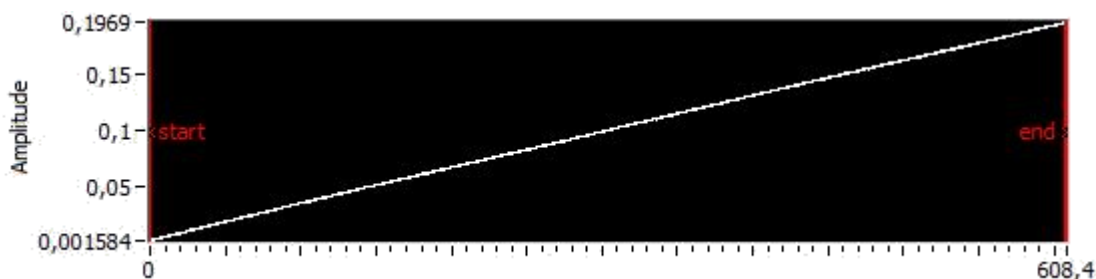


Figura 33 – Gráfico (Volts vs. Segundos) mostrando o erro cumulativo para o eixo z. Experimento realizado sem que houvesse qualquer aplicação de carga sobre a plataforma

Fonte: Aatoria Própria.

Visto que não foi possível a eliminação deste erro – provavelmente intrínseco ao equipamento – mesmo mediante extensiva revisão do manual de operação e cumprimento de todas as recomendações, optou-se por exportar todas as gravações para o software Microsoft Excel. Neste ambiente de trabalho foi possível descontar o erro acumulado em cada um dos pontos medidos e, então, confeccionar um gráfico da evolução da força de atrito com valores corrigidos.

A fórmula empregada para a eliminação do erro é apresentada a seguir.

$$Fa_n' = Fa_n - \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} * t_n * C \right) \quad (15)$$

Em que Fa_n' e Fa_n são, respectivamente, as força de atrito corrigida e medida pela plataforma para um tempo t_n , $\Delta V/\Delta t$ é a inclinação da reta obtida na medição de erro realizada após o experimento e C é o coeficiente de conversão do equipamento, de volt para newton. Para que houvesse uma padronização destas medições do erro, um intervalo de tempo Δt de aproximadamente 10 minutos foi estabelecido.

Então, a partir da equação (16), foi calculado o coeficiente de atrito.

$$\mu = Fa_n' / F_N \quad (16)$$

Onde Fa_n' é a força de atrito corrigida e F_N é a força normal medida no eixo y da plataforma piezelétrica.

3.3. DESENVOLVIMENTO DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO

A etapa de desenvolvimento dos suportes de fixação é apresentada na Figura 34 e envolveu desde a análise da situação problema até a fabricação dos componentes dos suportes de fixação da plataforma piezelétrica no torno e das amostras na plataforma.

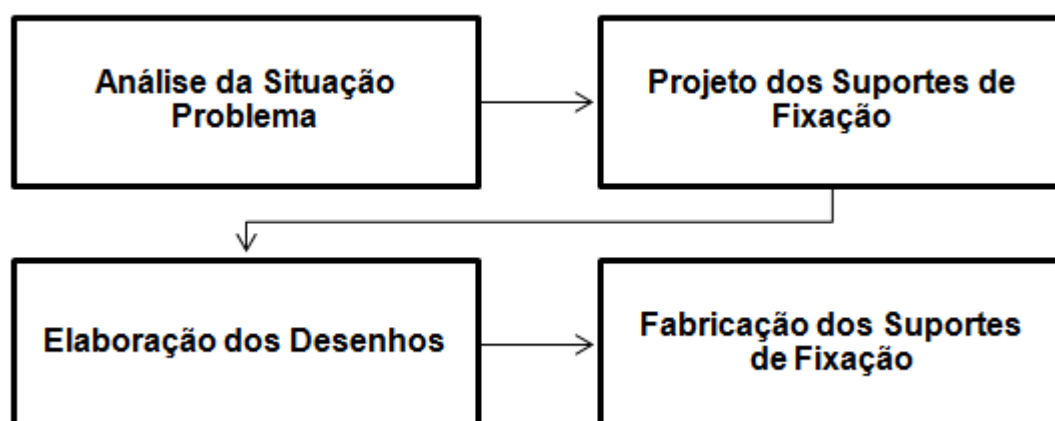


Figura 34 – Etapas do desenvolvimento dos suportes de fixação

Fonte: Autoria Própria.

3.3.1 Análise da Situação Problema

A partir do estudo bibliográfico mais aprofundado quanto às forças e condições atuantes na ferramenta durante o processo de usinagem, focado na região da superfície de folga da ferramenta, foram determinadas as seguintes informações fundamentais para o projeto:

- Modo de funcionamento: o processo de desgaste na superfície de folga da ferramenta de aço rápido decorre principalmente do movimento relativo de deslizamento existente entre a superfície de folga da ferramenta e o material da peça. Portanto, optou-se por simular tal situação através do deslizamento entre uma face plana (amostra) e a superfície cilíndrica de uma barra (barra de teste), sem a geração e remoção de cavaco, conforme apresentado na Figura 35.

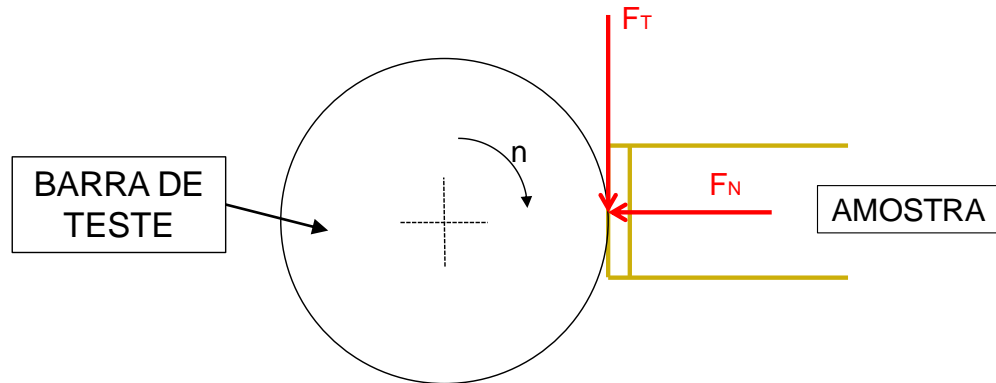


Figura 35 – Esquema de funcionamento do dispositivo, onde ' F_T ' é a força de atrito, ' F_N ' é a força normal aplicada à amostra e ' n ' é a rotação da barra de teste
Fonte: Autoria Própria.

- Pressão média do contato: de acordo com Silva (2014), a Força Residual para a usinagem a seco do aço ABNT 1045 com ferramenta de aço rápido é de aproximadamente 42 N, obtida através do método de extrapolação a zero. Ainda, o autor apresenta valores para a área de contato entre a peça e a superfície de folga durante o processo de usinagem, de modo a permitir a estimativa da tensão média atuante nesta região da ferramenta. Utilizando o valor aproximado de $0,65 \text{ mm}^2$ para a área, que é o valor intermediário medido pelo autor durante os seus experimentos, tem-se que a tensão média atuante é de aproximadamente 65 MPa.
- Velocidade de deslizamento: em tornos mecânicos convencionais, a velocidade de corte usual para a usinagem de aço com ferramentas de aço rápido é da ordem de 20 m/min. Assim, definiu-se que a velocidade de deslizamento (n) nos ensaios seria igual a esta velocidade de corte.

3.3.2 Projeto dos Suportes de Fixação da Plataforma Piezelétrica e das Amostras

O projeto dos suportes de fixação teve como base as informações levantadas durante a análise da situação problema, as condições limitantes dos equipamentos auxiliares – dimensões, tipo de fixação, disposição dos cabos – e critérios econômicos.

Inicialmente foram definidos os modos de fixação da plataforma piezelétrica no torno e das amostras na plataforma, considerando a geometria dos componentes, as forças existentes e o modo de funcionamento do dispositivo. Ainda, foi definido o modo de aplicação de força às amostras.

Em seguida, foram dimensionadas as peças e selecionados os componentes para os suportes de fixação e para o sistema de aplicação de força. Destaca-se que foi dada prioridade à utilização de componentes e de pré-formas (barras e chapas) comerciais ou disponíveis na própria universidade.

Por fim, foram gerados os desenhos de fabricação para cada componente, os quais se encontram nos Apêndices I e II. Estes mesmos desenhos, na sequência, foram encaminhados para a realização da etapa de usinagem das peças, a qual foi realizada a partir de pré-formas de aço ABNT 1020.

3.4. AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO

A última etapa do desenvolvimento do dispositivo compreendeu a montagem das peças (união dos suportes de fixação ao sistema de aquisição e monitoramento de dados) e a realização de testes preliminares e de ensaios de validação do dispositivo.

Foi comum aos testes preliminares e ensaios de validação, a preparação tanto da barra de teste quanto do torno mecânico. Na ocasião, optou-se por realizar os ensaios no torno mecânico convencional da marca Nardini modelo Mascote MS-205, do Laboratório de CNC da UTFPR.

A barra de teste foi usinada em aço ABNT 1045, de acordo com as dimensões apresentadas na Figura 36, utilizando ferramenta de metal duro e os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de corte aproximada de 40 m/min, 0,5 mm de profundidade de corte (ap) e 0,125 mm/rot de avanço (f).

A fim de se evitar desbalanceamentos e vibrações além daquelas inerentes à máquina, a barra de teste foi preparada no mesmo torno que, posteriormente, foi instalado o dispositivo.

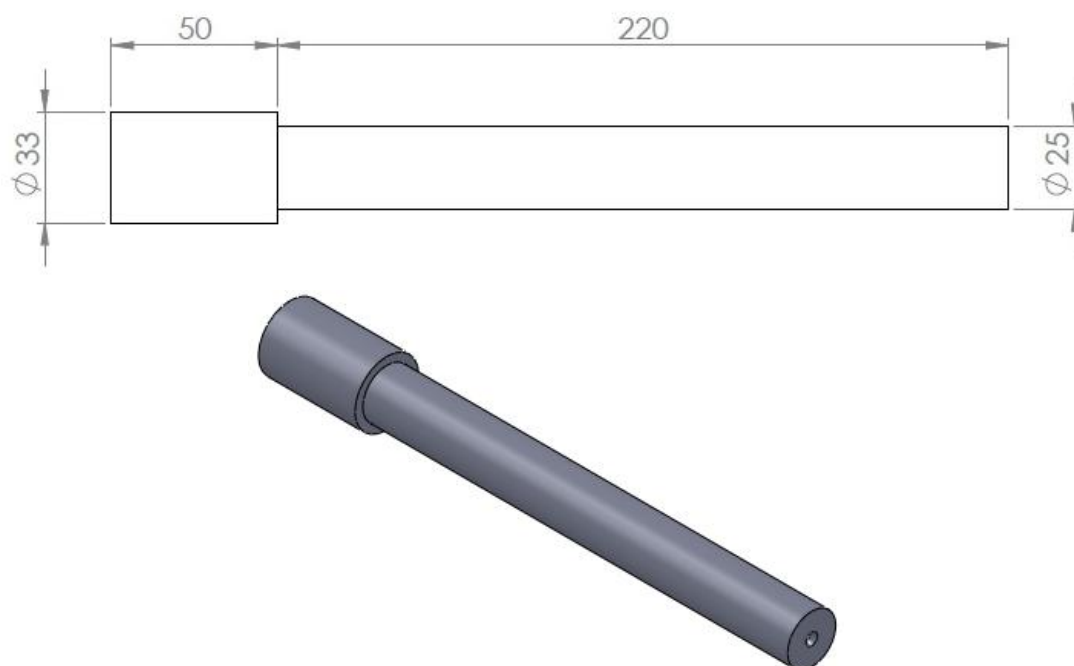


Figura 36 – Dimensões e vista isométrica da barra de teste preparada para os ensaios
Fonte: Autoria Própria.

Além disso, a fim de se verificar que o material utilizado era de fato aço ABNT 1045, uma amostra da barra foi utilizada para análise metalográfica e medição de dureza Vickers (HV 20/10). A Tabela 11 e a Figura 37 respectivamente apresentam os valores obtidos na medição de dureza e a microestrutura do aço utilizado para a preparação da barra de teste.

Tabela 11 – Valor médio e desvio padrão para a dureza do material da barra de teste

Dureza Média (HV 20/10)	Desvio Padrão (HV 20/10)
185,33	3,79

Fonte: Autoria Própria.

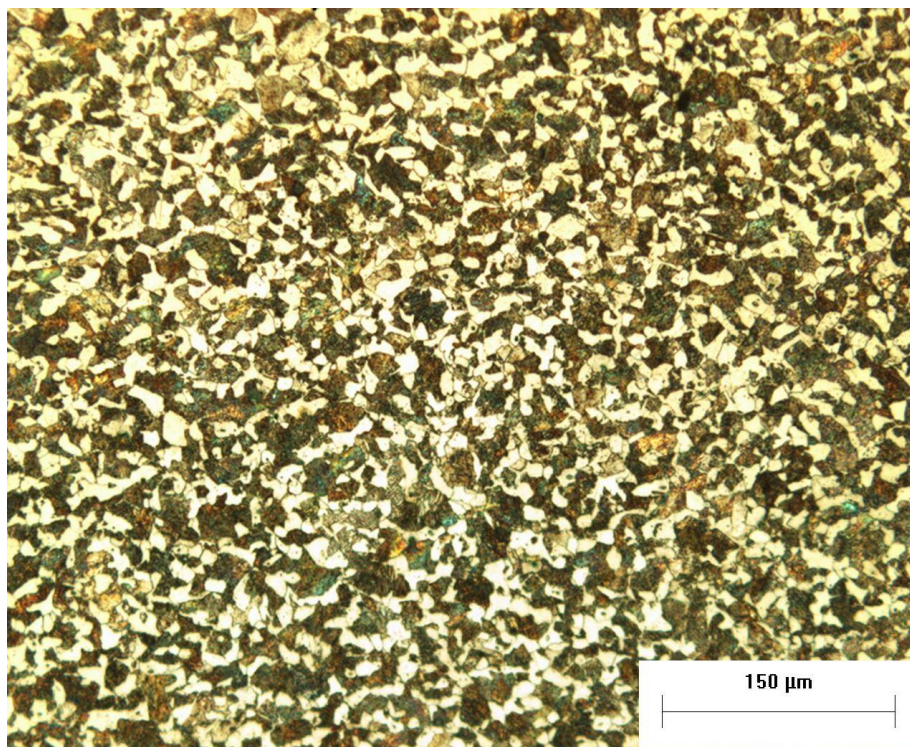


Figura 37 – Microestrutura do aço utilizado para a barra de teste
Fonte: Autoria Própria.

A partir de uma análise visual da quantidade presente de ferrita e perlita, bem como da faixa de dureza, o material utilizado para a confecção da barra de teste se trata de um aço médio carbono, a confirmar o código de cores presente na superfície da barra que indicava um aço ABNT 1045.

3.4.1 Testes Preliminares

A fim de se testar o funcionamento tanto dos suportes de fixação quanto do sistema de aquisição e monitoramento de dados; de se verificar e ajustar os parâmetros de tempo e força aplicada; e de se verificar o método de realização dos ensaios, quatro testes preliminares foram executados, cujas condições e parâmetros estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Condições utilizadas nos testes preliminares do dispositivo

Teste Preliminar	Condições	
01/02	Rotação do Eixo Árvore	250 RPM
	Velocidade de Deslizamento	20 m/min
	Tempo de Deslizamento	5 minutos
	Força de Contato	160 N
	Condição das Amostras	Estado de Fornecimento
03	Rotação do Eixo Árvore	250 RPM
	Velocidade de Deslizamento	20 m/min
	Tempo de Deslizamento	30 minutos
	Força de Contato	160 N
	Condição da Amostra	Tratamento Duplex: Rugosidade gerada em granulometria 600
04	Rotação do Eixo Árvore	250 RPM
	Velocidade de Deslizamento	20 m/min
	Tempo de Deslizamento	5 minutos
	Força de Contato	160 N
	Condição da Amostra	Tratamento Duplex: Rugosidade gerada em granulometria 600

Fonte: Autoria Própria.

3.4.2 Validação do Dispositivo

A validação do dispositivo foi dividida em três etapas:

- Ensaio das amostras;
- Caracterização das superfícies e dos grupos de rugosidade quanto aos seus desempenhos em relação ao desgaste;
- Comparação quanto ao desempenho das amostras preparadas nas condições mais extremas (220 e polida).

Para tanto, foram realizados três ensaios para cada grupo de rugosidade sob as condições aprovadas durante os testes preliminares. Tais condições são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Condições utilizadas nos ensaios de validação do dispositivo

Condições	
Rotação do Eixo Árvore	250 RPM
Velocidade de Deslizamento	20 m/min
Tempo de Deslizamento	10 minutos
Força de Contato	160 N
Condição da Amostra	Tratamento Duplex: Rugosidade gerada em granulometria 220, 600 e por processo de polimento (1 μm)

Fonte: Autoria Própria.

Após os ensaios, as amostras foram novamente limpas, a fim de se visualizar com maior clareza a região do contato. Deste modo, elas foram levadas ao equipamento de agitação ultrassônica – marca Struers modelo Metason 60T – por quinze minutos.

Na sequência, então, todas as amostras foram levadas ao Estéreo Microscópio, marca Olympus modelo SZX10, e duas amostras extremas – aquelas com maior e menor desgaste – ao Microscópio Confocal, marca Olympus modelo FluoView FV1200, no qual foi possível obter imagens de toda a extensão e profundidade da região desgastada com passos de 0,5 μm .

Além disso, a partir das imagens obtidas com o Microscópio Confocal, reconstruiu-se a topografia das regiões de contato para as duas amostras através do *software* MountainsMap Premium versão 7.2, da empresa DigitalSurf. Este permite a composição de uma série a partir das imagens separadas; a obtenção das curvas de nível; o nivelamento da superfície; e a geração de uma imagem tridimensional, através das funções *Build Series*, *Multifocus Reconstruction*, *Level*, *3D View* e *Stitch*, respectivamente.

A função *Level* foi realizada pelo método do plano definido por três pontos, conforme apresentado na Figura 38, e a função *Stitch* foi realizada com as opções padrão do programa.

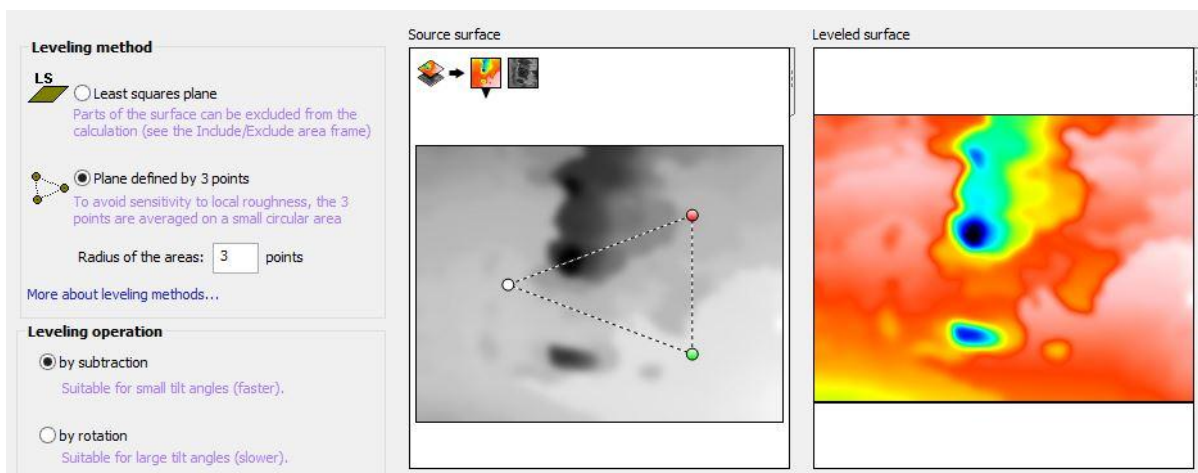


Figura 38 – Função *Level*, através do método do plano definido por três pontos

Fonte: Autoria Própria.

Por fim, através das imagens foi possível determinar a largura de contato, a profundidade da região desgastada e, também, comparar qualitativa e visualmente a região desgastada de cada amostra e grupo de rugosidade, a fim de se analisar as diferenças dessas regiões para cada condição de preparo, além de determinar qual condição apresenta o melhor desempenho – menor região de desgaste. Ainda, junto à análise das curvas de forças (normal e de atrito) e de coeficiente de atrito, foi possível determinar a pressão normal média de contato através da equação (5), apresentada na seção de fundamentação teórica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões serão apresentados em duas partes: desenvolvimento dos suportes de fixação; e avaliação do dispositivo.

4.1 DESENVOLVIMENTO DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO

Incluem-se nesta parte as etapas de projeto dos suportes de fixação da plataforma piezelétrica ao torno e, também, das amostras à plataforma.

4.1.1 Projeto do Suporte de Fixação da Plataforma Piezelétrica

Após definido que o modo de funcionamento do dispositivo seria pelo deslizamento entre a face plana da amostra e a superfície cilíndrica da barra de teste, definiu-se que o modo de fixação da plataforma piezelétrica no torno seria no carro transversal, tornando necessária a retirada do castelo, conforme apresentado na Figura 39.

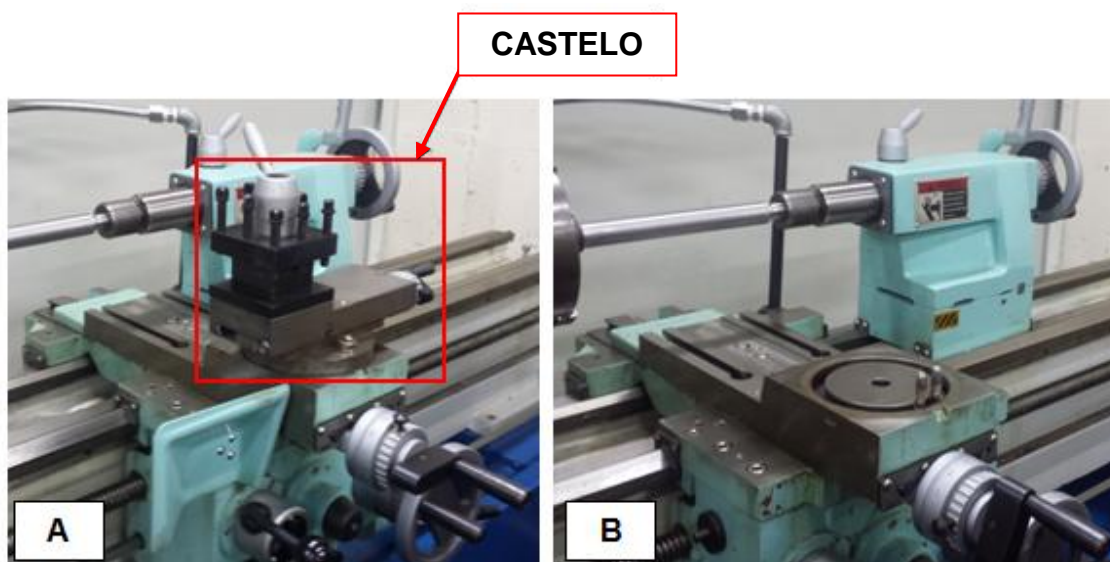


Figura 39 – Retirada do castelo (A para B) para fixação da plataforma piezelétrica no torno
Fonte: Autoria Própria.

A plataforma contém as próprias abas laterais com a finalidade de fixá-la. No entanto, as dimensões destas abas extrapolam os limites laterais do carro

transversal, conforme apresentado na Figura 40, de modo que a fixação direta ao carro transversal não foi possível. Por este motivo, foi projetado um suporte a fim de posicionar, nivelar e prender a plataforma ao torno.



Figura 40 – Posição das abas da plataforma em relação ao carro transversal do torno

Fonte: Autoria Própria.

A sequência apresentada a seguir mostra os primeiros três componentes deste suporte. Tais componentes são fixados por meio de parafusos e porcas (Figura 41 – A e B), restringindo a plataforma no mesmo sentido de movimento do carro transversal (Figura 41 – C e D).

Os demais componentes do suporte são apresentados na Figura 42, e têm por função restringir o movimento da plataforma nos demais sentidos. Para tanto, foram fabricadas quatro abas – duas superiores e duas inferiores – que são presas àqueles componentes apresentados e também às abas próprias da plataforma, por meio de parafusos e porcas.

A lista com os componentes utilizados no suporte de fixação da plataforma e os desenhos de fabricação dos componentes são apresentados no Apêndice I.

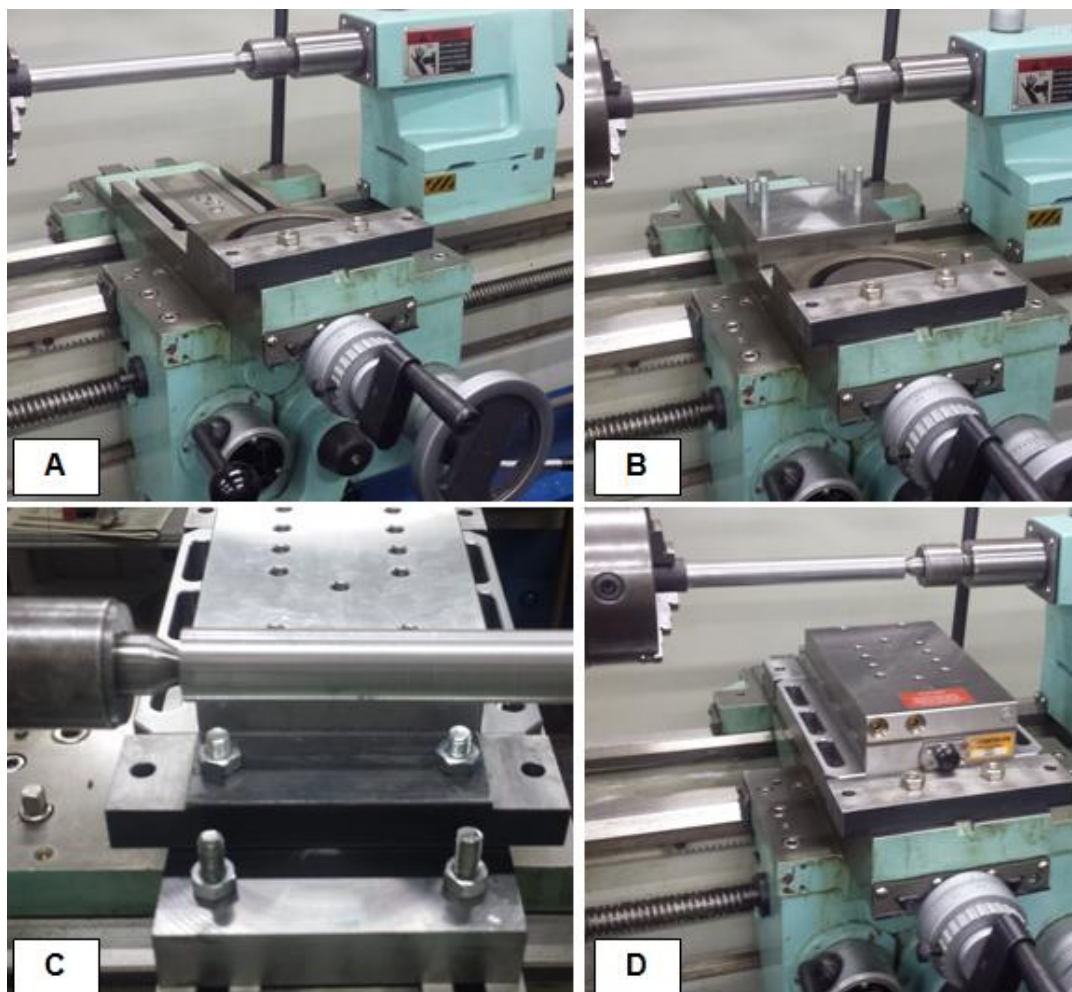


Figura 41 – Os três primeiros componentes do suporte de fixação da plataforma, restringindo-a no sentido de movimento do carro transversal

Fonte: Autoria Própria.



Figura 42 – Os demais componentes do suporte de fixação da plataforma montados, restringindo-a em todos os sentidos de movimento

Fonte: Autoria Própria.

4.1.2 Projeto do Suporte de Fixação das Amostras

Após a definição do modo de fixação da plataforma e o projeto do suporte de fixação da mesma, deu-se início ao projeto do suporte de fixação das amostras à plataforma.

Inicialmente, a fim de simplificar o dispositivo, decidiu-se que a força seria aplicada por um pistão pneumático localizado atrás das amostras, conforme apresentado na Figura 43, de modo que a força seja aplicada quando for deslocado o carro transversal do torno.

Devido à necessidade de haver este deslocamento para a aplicação de força, foi definido que as amostras seriam alocadas em uma guia linear de esferas, a qual possui baixos valores para o momento de inércia e o coeficiente de atrito, além de permitir o deslocamento em apenas um sentido sobre o trilho, conforme também apresentado na Figura 43.

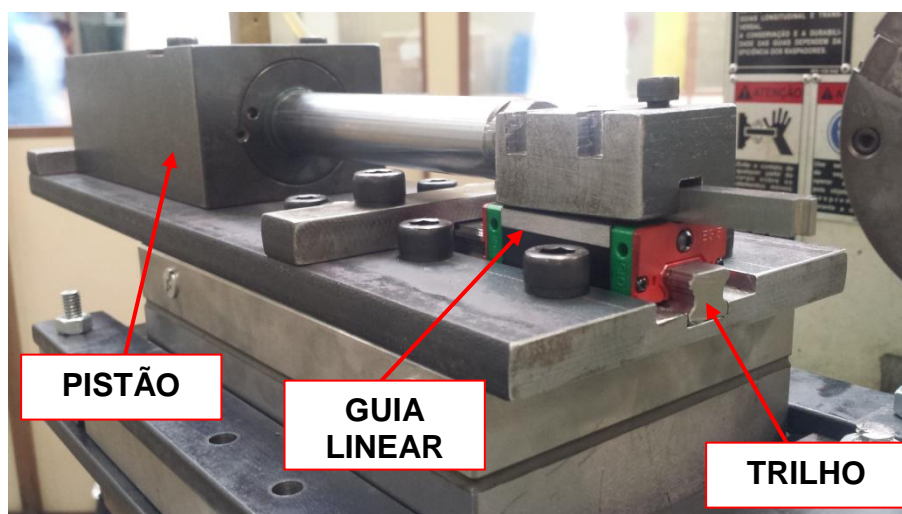


Figura 43 – Posicionamento do pistão pneumático e da guia linear de esferas/trilho

Fonte: Autoria Própria.

Em seguida, a partir da geometria e das dimensões do pistão pneumático, do conjunto guia linear/trilho e da plataforma piezelétrica, foram selecionados e dimensionados os demais componentes do suporte.

O principal componente fabricado para este suporte é a chapa inferior que fixa os demais componentes à plataforma, cujo modelo é apresentado na Figura 44. Para tanto, foram usinados furos passantes, dos quais quatro apresentam rosca

para parafusar o pistão e o trilho à chapa, além de dois canais para o posicionamento do trilho e para permitir o deslocamento da guia linear.

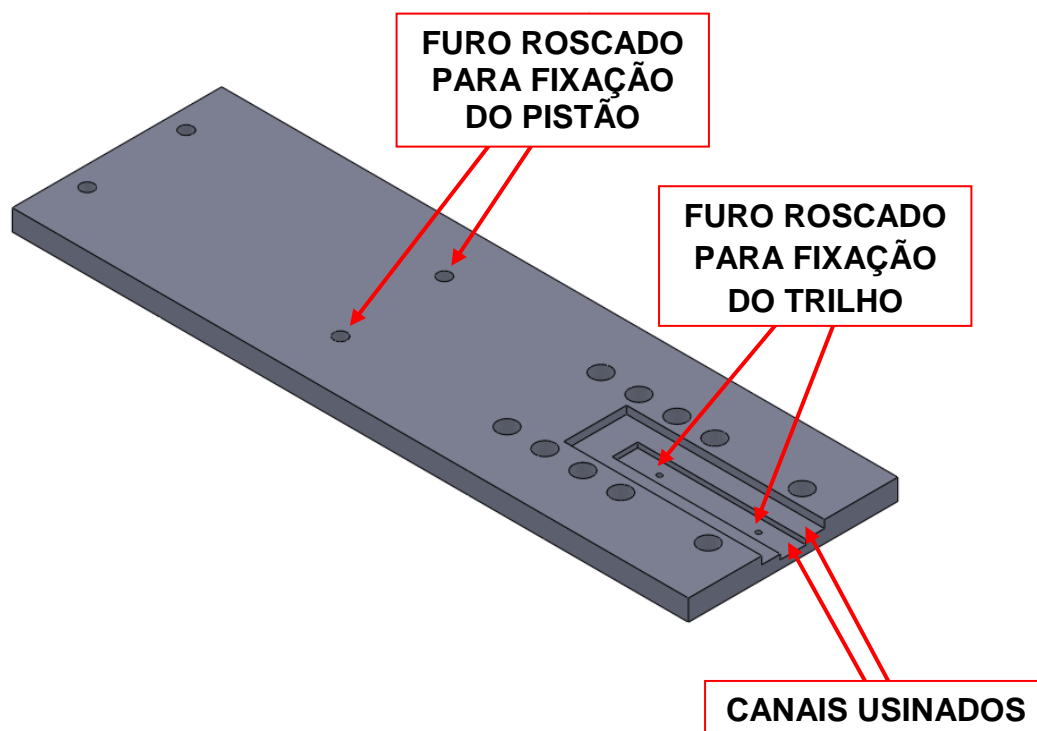


Figura 44 – Modelo da chapa de fixação dos componentes

Fonte: Autoria Própria.

Na sequência, então, foi projetado o porta amostra, componente que permite a fixação da amostra durante os ensaios. Para isto, a partir de uma pré-forma de aço foram usinados quatro rebaixos com furos passantes para a fixação na guia linear, além de um canal e um furo com rosca para o posicionamento e fixação da amostra, conforme indicado na Figura 45.

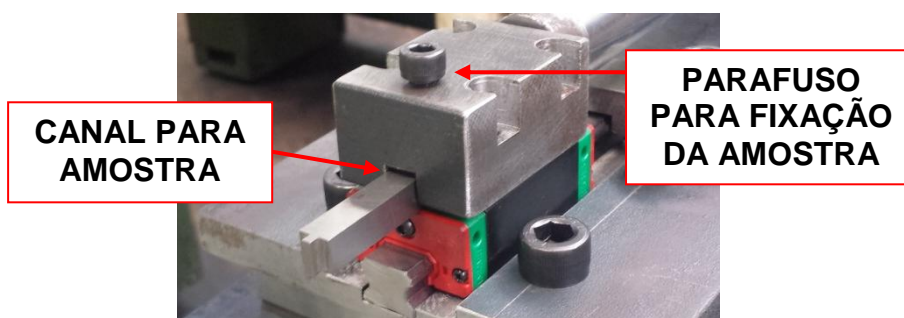


Figura 45 – Porta amostra

Fonte: Autoria Própria.

Os demais componentes têm por função evitar o deslocamento do pistão pneumático e reforçar a fixação do trilho, evitando a rotação devido à existência de momentos.

O suporte de fixação das amostras completamente montado é apresentado na Figura 46, enquanto a lista dos componentes utilizados e os desenhos de fabricação dos componentes são apresentados no Apêndice II.

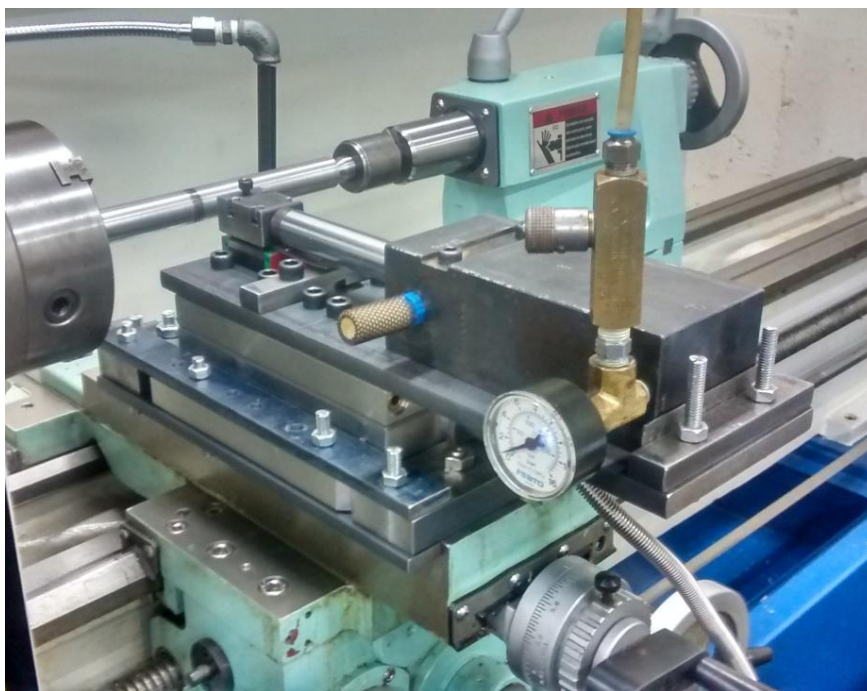


Figura 46 – Suporte de fixação das amostras
Fonte: Autoria Própria.

4.2 AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO

Incluem-se nesta parte os resultados obtidos dos testes preliminares e dos ensaios de validação do dispositivo.

4.2.1 Testes Preliminares

A seguir são apresentados os resultados obtidos durante os testes preliminares, os quais foram base para a definição das condições dos ensaios de validação do dispositivo.

4.2.1.1 Testes Preliminares 01 e 02

As regiões desgastadas das amostras utilizadas nos testes preliminares 01 e 02 são apresentadas nas Figuras 47 e 48, respectivamente.

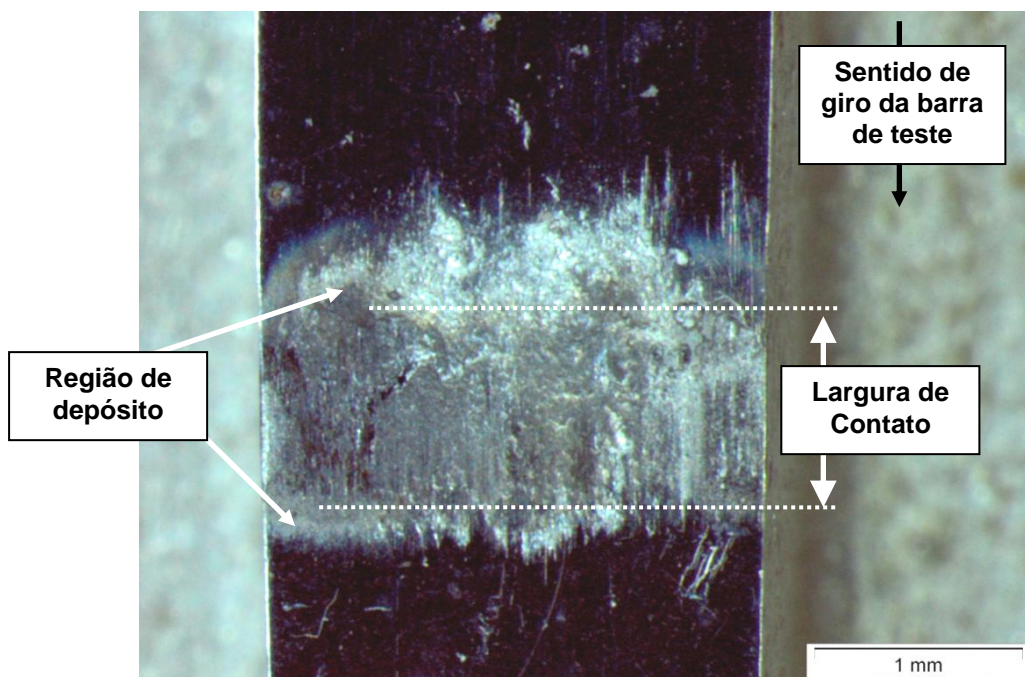


Figura 47 – Região do contato para o 1º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria.

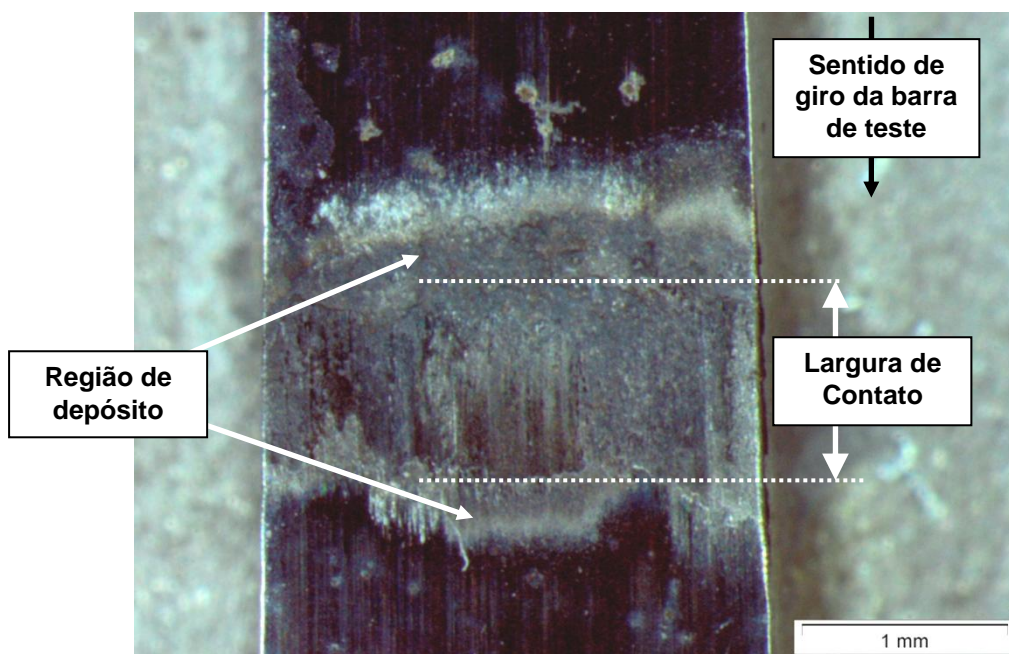


Figura 48 – Região do contato para o 2º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria.

Tais testes foram fundamentais ao possibilitar o primeiro contato com o dispositivo em funcionamento, de modo a permitir tanto a verificação da metodologia empregada nos ensaios, quanto a verificação do funcionamento do sistema.

Neste sentido, uma importante observação é que os limites da região de contato são determinados pela presença de depósito, conforme indicado anteriormente nas Figuras 47 e 48.

Outro ponto de destaque está relacionado com a aquisição dos dados. A partir do software LabVIEW SignalExpress 3.0, foram obtidas as curvas reais de evolução no tempo das forças normal e de atrito para os dois testes. No entanto, isto gerou uma quantidade bastante grande de dados, que dificultou o seu tratamento no software Microsoft Excel por motivo de incapacidade de processamento do computador. A solução para tanto foi adquirir a média das forças, e não o seu valor real.

4.2.1.2 Teste Preliminar 03

A Figura 49 apresenta a região do contato para a amostra do terceiro teste preliminar. A partir dela é possível observar que o revestimento de nitreto de titânio foi severamente arrancado durante o teste, expondo as camadas inferiores. Ainda, notam-se ao redor da área desgastada regiões com coloração escura, as quais podem indicar que elevadas temperaturas foram atingidas durante o teste.

Ademais, é possível observar regiões de material depositado sobre a camada de TiN, da mesma forma que nos testes anteriores, com amostras no estado de fornecimento. Estas regiões, portanto, demarcam o início do contato (acima) e o seu término (abaixo), conforme indicado na Figura 49.

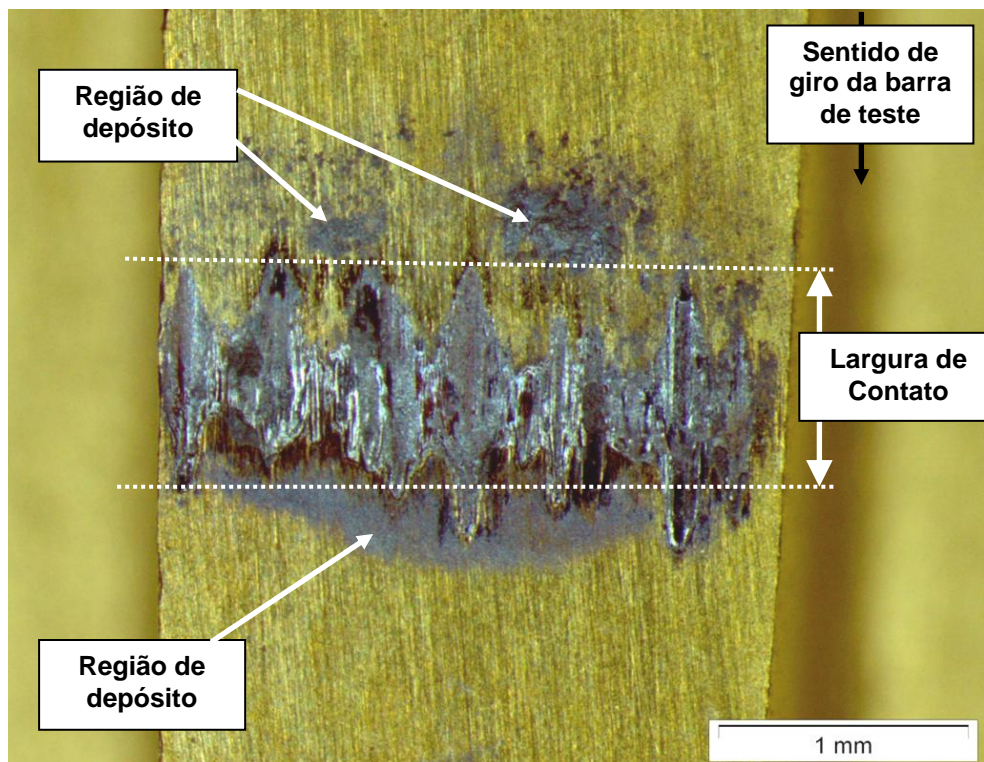


Figura 49 – Região do contato para a amostra do 3º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

A seguir são apresentadas, respectivamente, as curvas de evolução no tempo das médias das forças normal e de atrito, e do coeficiente de atrito durante os trinta minutos de teste.

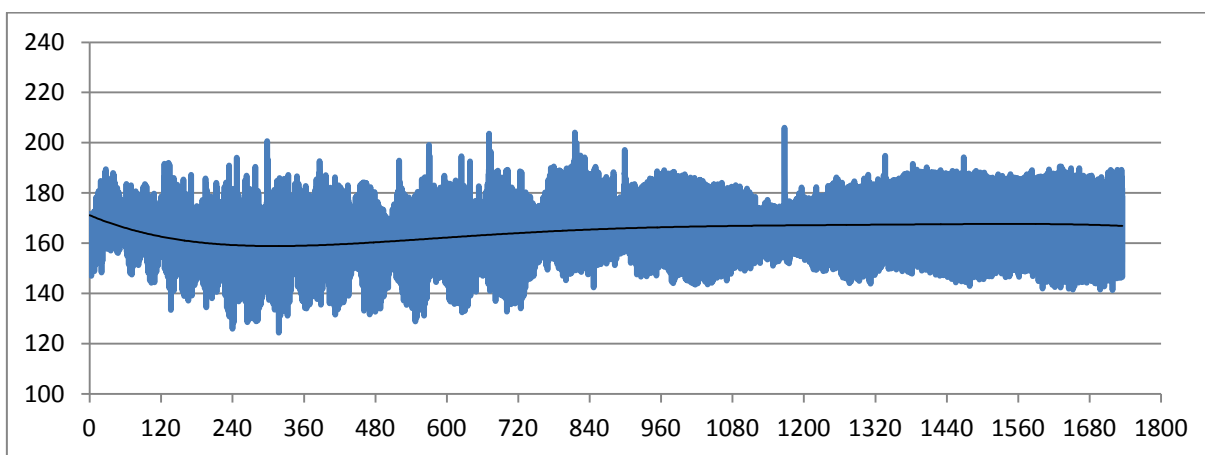


Gráfico 03 – Evolução da força média normal (N) no tempo (s) para o 3º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

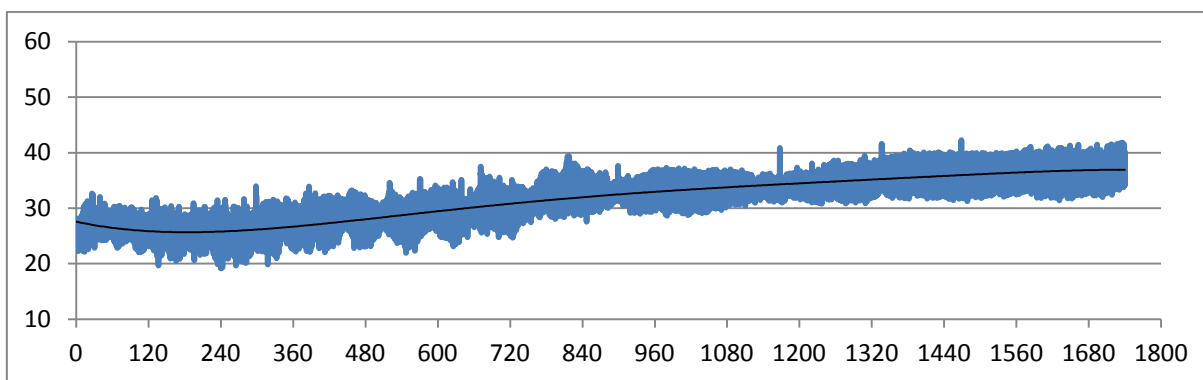


Gráfico 04 – Evolução da força média de atrito (N) no tempo (s) para o 3º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

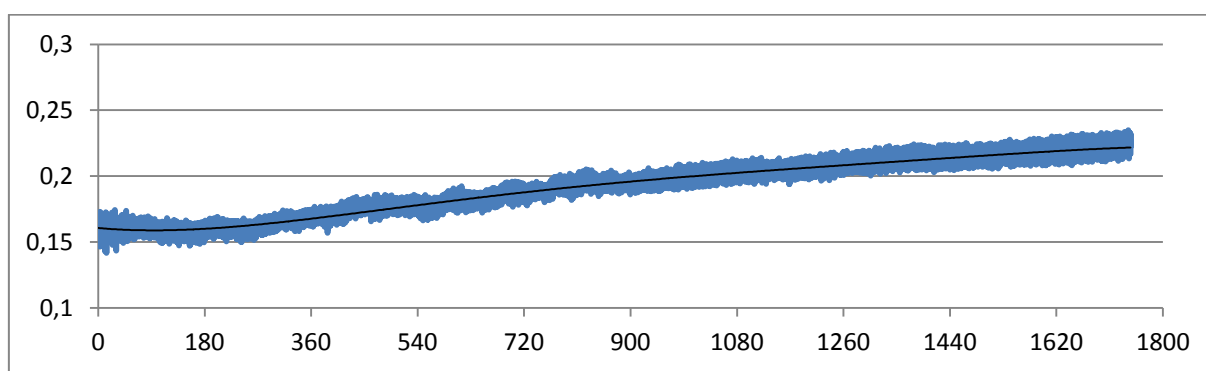


Gráfico 05 – Evolução do coeficiente de atrito no tempo (s) para o 3º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

A partir das curvas acima e da área da região de contato é possível estimar a pressão média normal de contato, em torno de 70 MPa, a qual se apresenta levemente acima daquela estimada através da literatura para o contato ferramenta-peça durante a usinagem.

A partir disto, conclui-se que o intervalo de tempo – trinta minutos – foi o fator responsável por tornar este teste muito severo, inviabilizando-o para casos que exijam maior sensibilidade.

A fim de se determinar qual seria de fato o intervalo de tempo ideal, foi realizada uma análise dos dados adquiridos durante o terceiro teste preliminar.

Observa-se que durante o intervalo inicial de tempo o coeficiente de atrito médio se manteve relativamente constante. Isto pode ser mais bem observado no Gráfico 06, que mostra a evolução do coeficiente de atrito nos quatro primeiros minutos do teste.

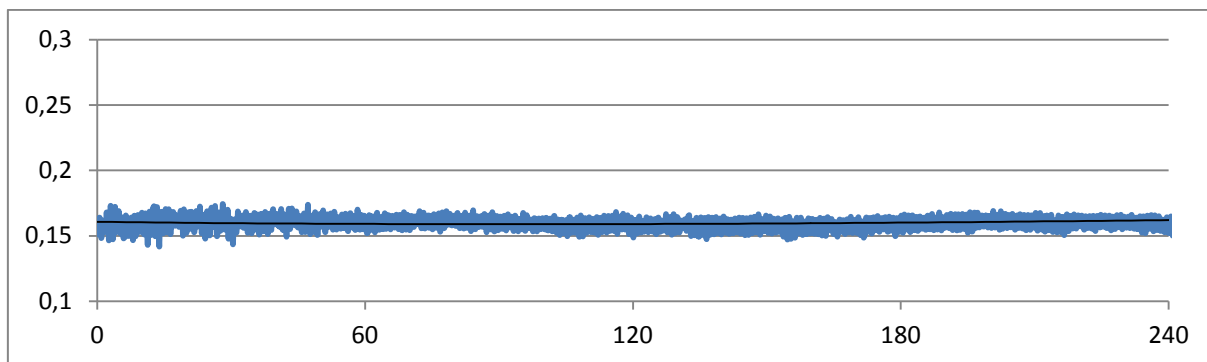


Gráfico 06 – Evolução do coeficiente de atrito nos quatro primeiros minutos do teste

Fonte: Autoria Própria

No decorrer do teste, o coeficiente de atrito se apresentou crescente, conforme apresentado no Gráfico 07. Isto pode indicar o início do arrancamento da camada de nitreto de titânio, fazendo com que o contato não seja apenas entre o nitreto de titânio e o aço (barra de teste), mas também entre o aço e as camadas inferiores da amostra.

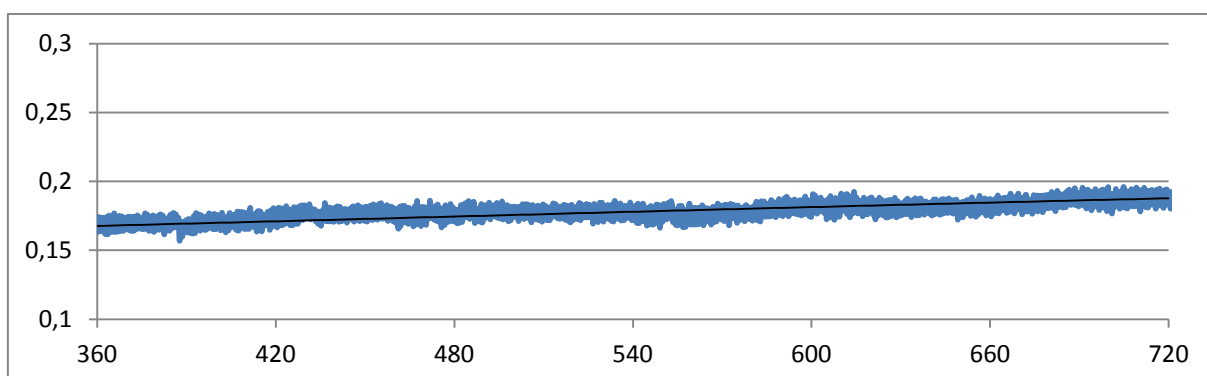


Gráfico 07 – Evolução do coeficiente de atrito no intervalo de 6-12 minutos de teste

Fonte: Autoria Própria

Desta forma, há uma indicação de que o revestimento começa a ser arrancado a partir do quarto minuto de contato. Para verificar, o quarto teste preliminar foi realizado, tendo em vista a necessidade de se padronizar as condições para os ensaios de validação, especialmente em relação ao intervalo de tempo, o qual deve ser suficiente para que a camada de nitreto de titânio seja arrancada sem, no entanto, afetar a sensibilidade às diferenças na preparação das amostras.

4.2.1.3 Teste Preliminar 04

A Figura 50 apresenta a região do contato para a amostra do quarto teste preliminar. A partir dela é possível observar que o revestimento de nitreto de titânio foi levemente arrancado, expondo pequenas regiões das camadas inferiores, e ainda, maiores regiões com depósito de material quando comparado ao teste anterior.

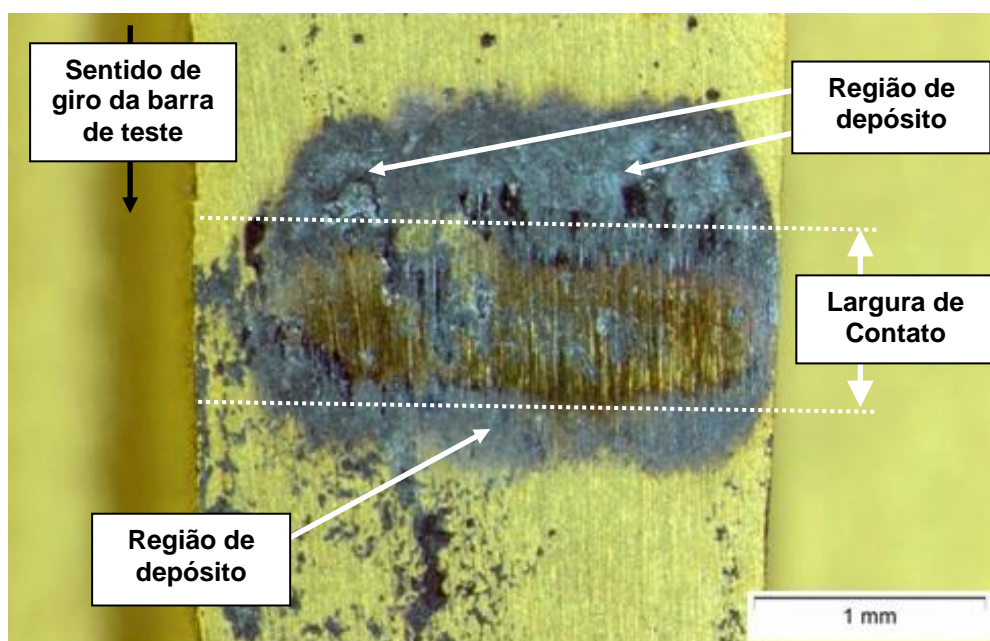


Figura 50 – Região do contato para a amostra do 4º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

A seguir são apresentadas as curvas de evolução no tempo das médias das forças normal e de atrito, e do coeficiente de atrito, respectivamente.

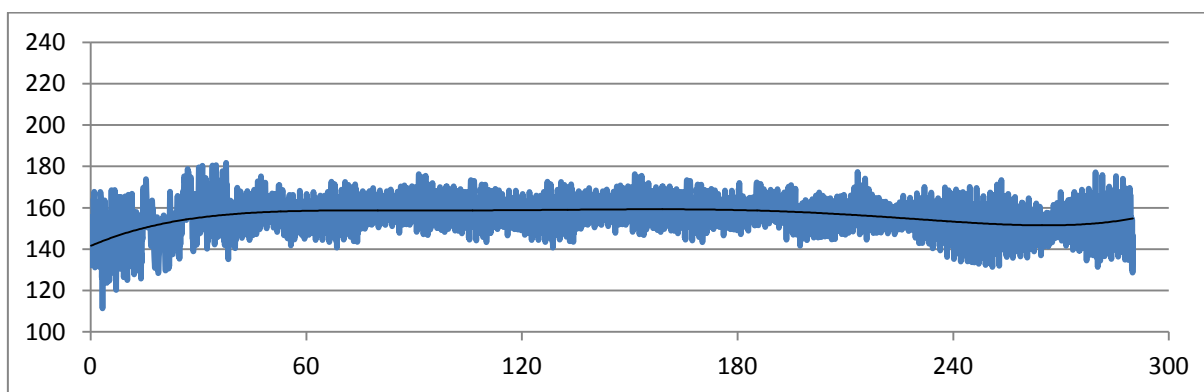


Gráfico 08 – Evolução da força média normal (N) no tempo (s) para o 4º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

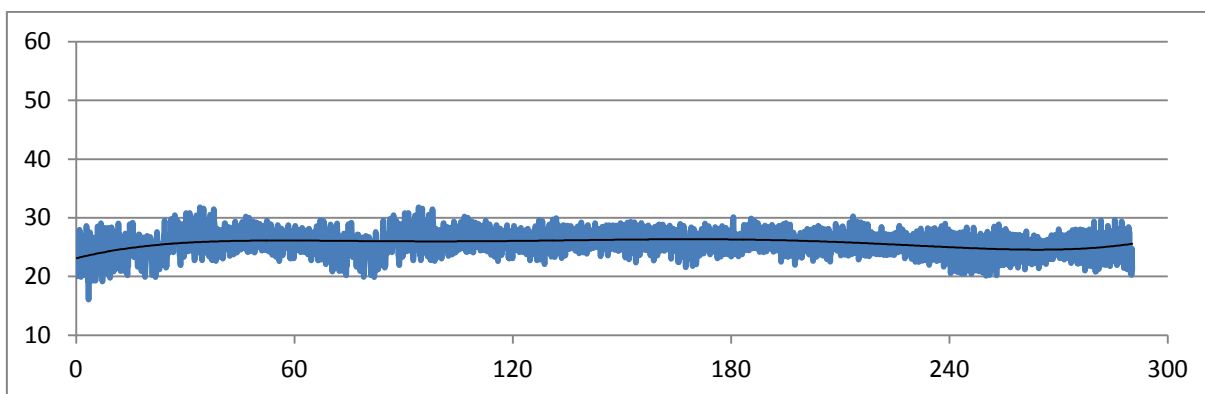


Gráfico 09 – Evolução da força média de atrito (N) no tempo (s) para o 4º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

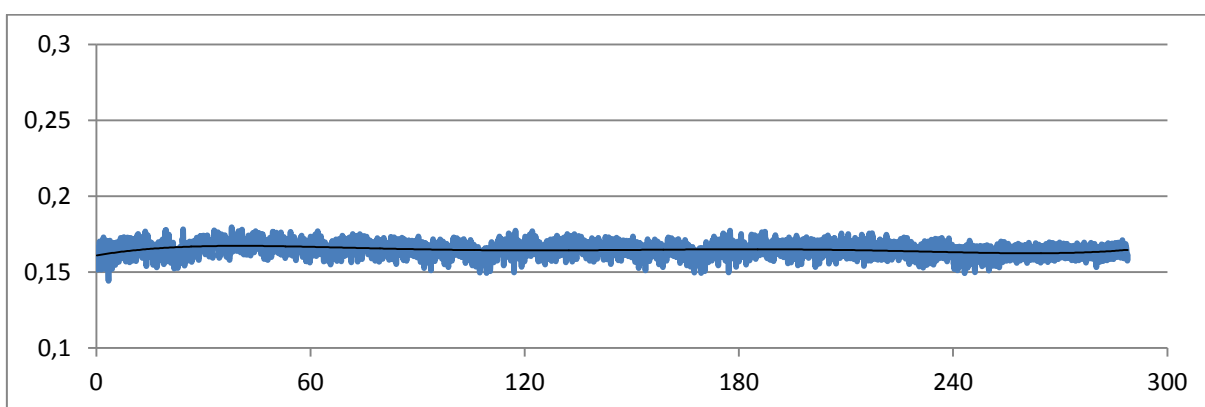


Gráfico 10 – Evolução do coeficiente de atrito no tempo (s) para o 4º teste preliminar

Fonte: Autoria Própria

A partir das curvas acima e da área da região de contato, estima-se a pressão média normal de contato em torno de 75 MPa, próxima tanto àquela do teste anterior quanto àquela estimada pela literatura.

Conclui-se, então, que o intervalo de tempo de cinco minutos reduziu consideravelmente a severidade do teste. No entanto, a região de desgaste se mostrou muito pequena, o que também pode tornar os ensaios insensíveis às diferenças de rugosidade das amostras.

Desta forma, portanto, serão realizados os ensaios de validação num intervalo de tempo intermediário, de 10 minutos, sob a aplicação média de 160 N de força normal.

Ao fim destes quatro testes, verificou-se o funcionamento do dispositivo em sua totalidade. De forma geral, esta etapa permitiu a determinação do intervalo

de tempo para os ensaios de validação e a identificação de um erro de medição associado ao eixo z do sistema de aquisição de forças. Conforme apresentado na seção Materiais e Métodos, este erro foi eliminado posteriormente aos ensaios. No mais, o dispositivo apresentou correto funcionamento, permitindo o avanço para a etapa de validação.

4.2.2 Ensaios de Validação

A seguir são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de validação para três amostras de cada grupo de rugosidade, além da comparação do desempenho quanto ao desgaste das amostras preparadas na granulometria 220 e pelo processo de polimento.

4.2.2.1 Amostras Preparadas na Granulometria 220

As Figuras 51 e 52 apresentam as regiões de contato para as amostras testadas. A partir delas é possível observar visualmente que o revestimento de nitrato de titânio foi moderadamente arrancado durante os ensaios, de forma a expor algumas regiões das camadas inferiores.

Neste sentido, nota-se que é estreita a região arrancada de forma uniforme, ou seja, em quase toda a extensão do contato. De forma geral, a região desgastada se apresenta em pequenas extensões não conectadas entre si e com aspecto irregular.

Ainda, pode se observar a diferença de desempenho entre as amostras do mesmo grupo de rugosidade. Desta forma, a amostra 2 apresentou o pior desempenho – maior região desgastada, enquanto a 3, o melhor – menor região desgastada.

De modo geral, pode-se visualizar que uma grande quantidade de material ficou depositada à superfície, tanto no início quanto ao final da região de contato.

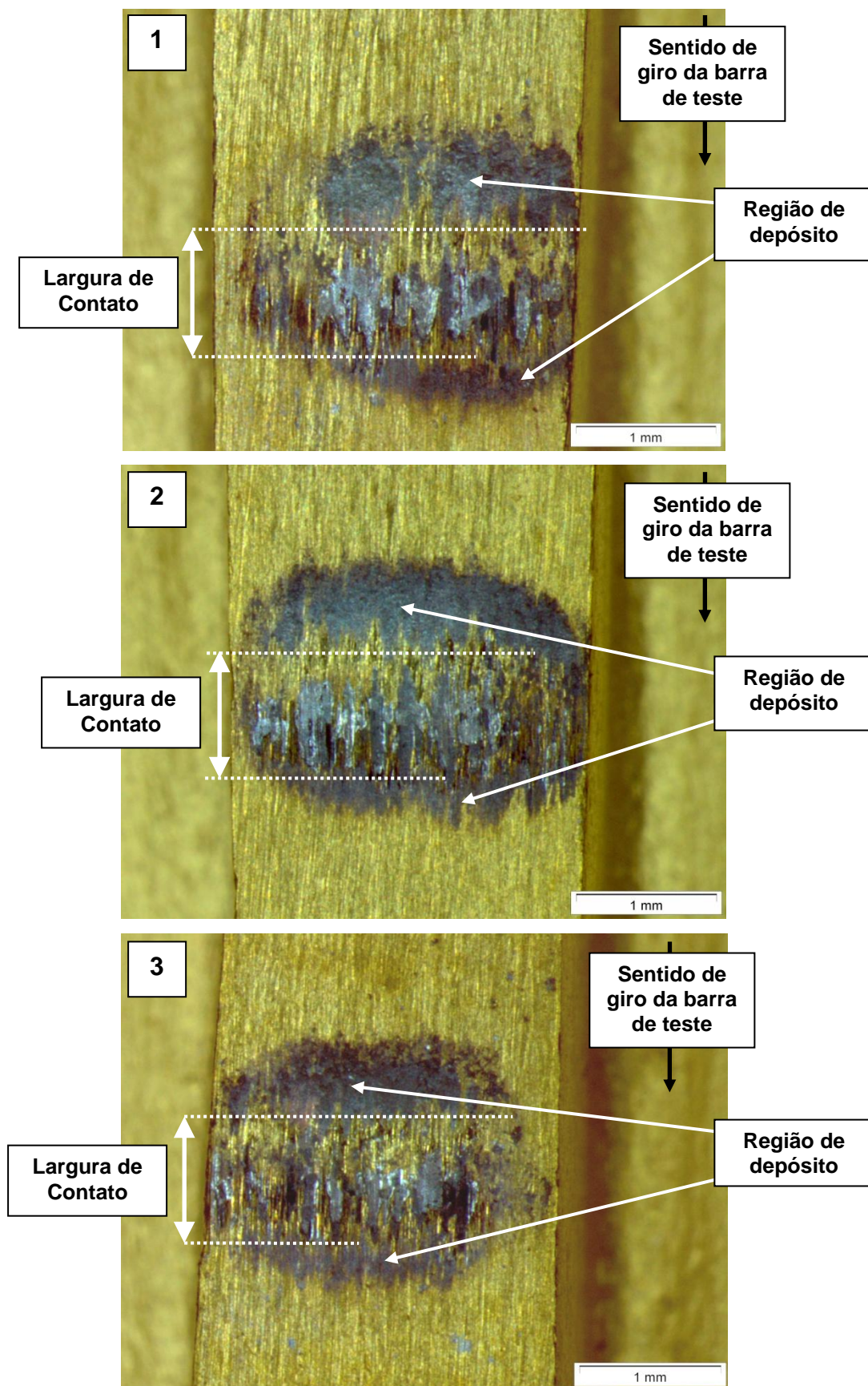


Figura 51 – Região do contato para as amostras lixadas na granulometria 220

Fonte: Autoria Própria.

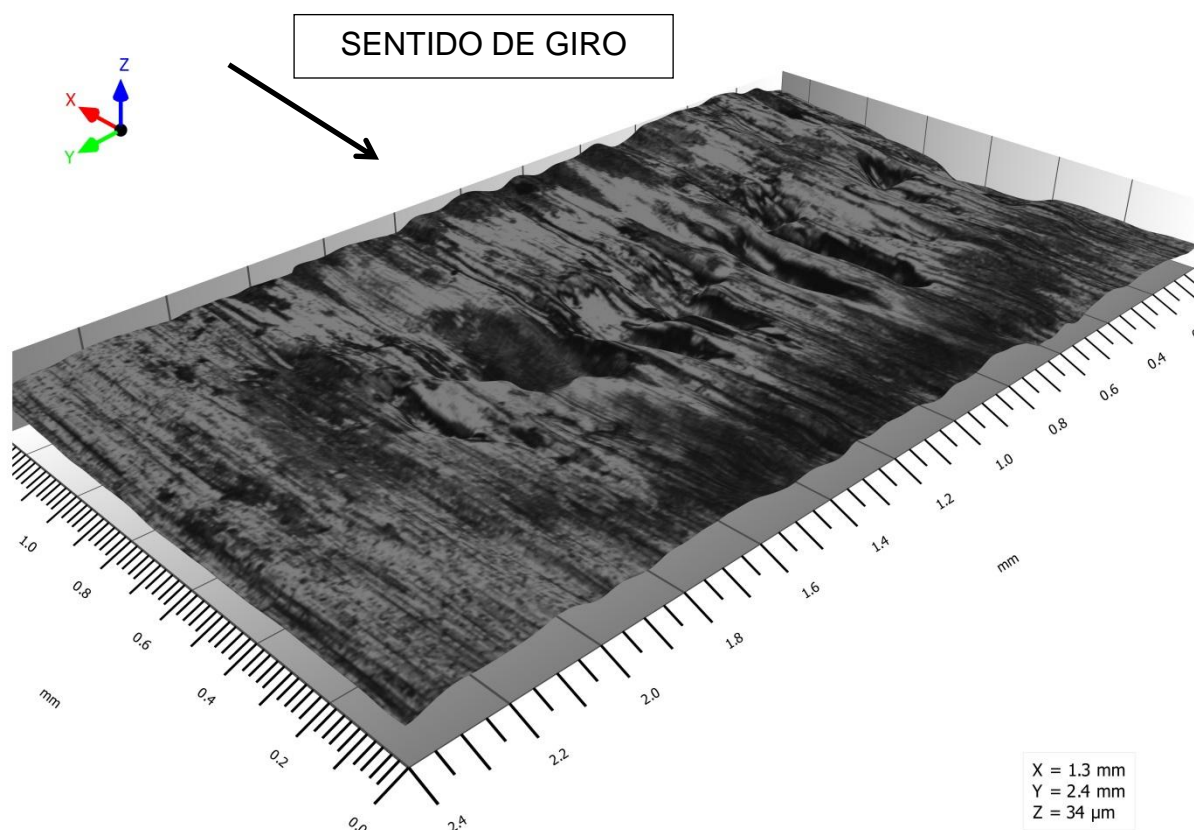


Figura 52 – Reconstrução 3D da região do contato da amostra 3 (ampliação do eixo z em 7%)
Fonte: Autoria Própria.

A seguir são apresentadas as evoluções no tempo das curvas de tendência das forças normal e de atrito, e do coeficiente de atrito, respectivamente.

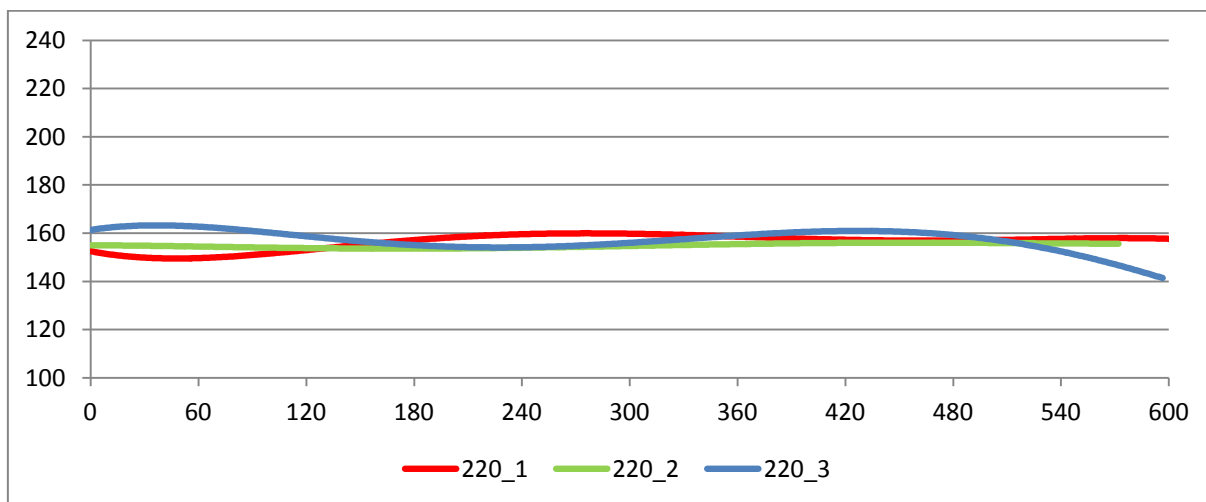


Gráfico 11 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) da força normal (N)

Fonte: Autoria Própria.

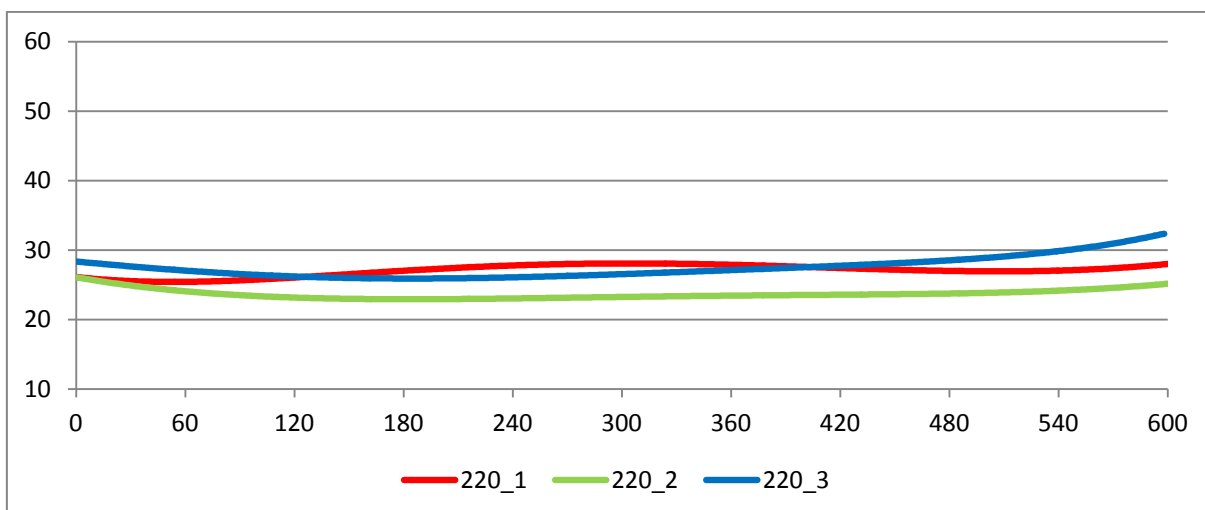


Gráfico 12 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) da força de atrito (N)

Fonte: Autoria Própria.

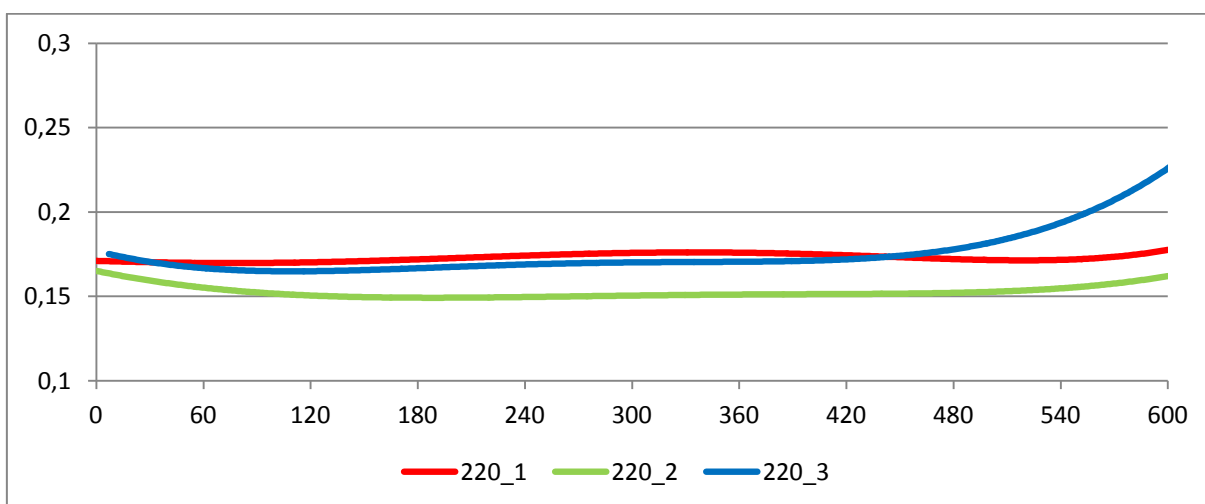


Gráfico 13 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) do coeficiente de atrito

Fonte: Autoria Própria.

A partir do Gráfico 11 é possível observar a evolução no tempo da tendência da força normal aplicada. Para as três amostras, a média da força permaneceu em torno de 160 N, com algumas flutuações decorrentes do processo de ajuste da força, o qual é necessário durante o ensaio para mantê-la no patamar recomendado. Este processo ocorre manualmente através do carro transversal do torno. Além disso, a pressão normal média de contato para as três amostras ficou em torno de 70 MPa, mantendo-se levemente superior àquela estimada através da literatura para o contato ferramenta-peça durante a usinagem.

Por fim, as três amostras apresentaram uma tendência de crescimento da força de atrito e do coeficiente de atrito ao longo do ensaio, principalmente nos minutos finais, conforme os Gráficos 12 e 13. Vale destacar que durante o último minuto do ensaio da amostra 3 houve um aumento significativo na vibração do sistema. Isto pode ser observado através da grande oscilação presente nos gráficos, principalmente no de coeficiente de atrito. Entretanto, mesmo com a presença desta vibração, a amostra apresentou o melhor desempenho quanto ao desgaste dentre aquelas do seu grupo de rugosidade.

4.2.2.2 Amostras Preparadas na Granulometria 600

A Figura 53 apresenta as regiões de contato para as amostras testadas. É possível observar, assim como no grupo de rugosidade anterior, que o revestimento de nitreto de titânio foi arrancado, no entanto, com maior severidade, expondo uma maior área das camadas inferiores.

Neste sentido, visualmente se nota que a região arrancada se apresenta de maneira mais uniforme, em quase toda a extensão do contato. São poucas as regiões de desgaste que não se encontram conectadas entre si. Além disso, o aspecto destas regiões é diferenciado. É possível observar tanto regiões irregulares quanto regiões de maior regularidade.

Ainda, pode se novamente observar a diferença de desempenho entre amostras do mesmo grupo. Desta forma, as amostras 1 e 3 apresentaram desempenhos semelhantes entre si, mas melhores que o apresentado pela amostra 2 – maior região desgastada.

De modo geral, também é observado o depósito de material na superfície nos limites do contato.

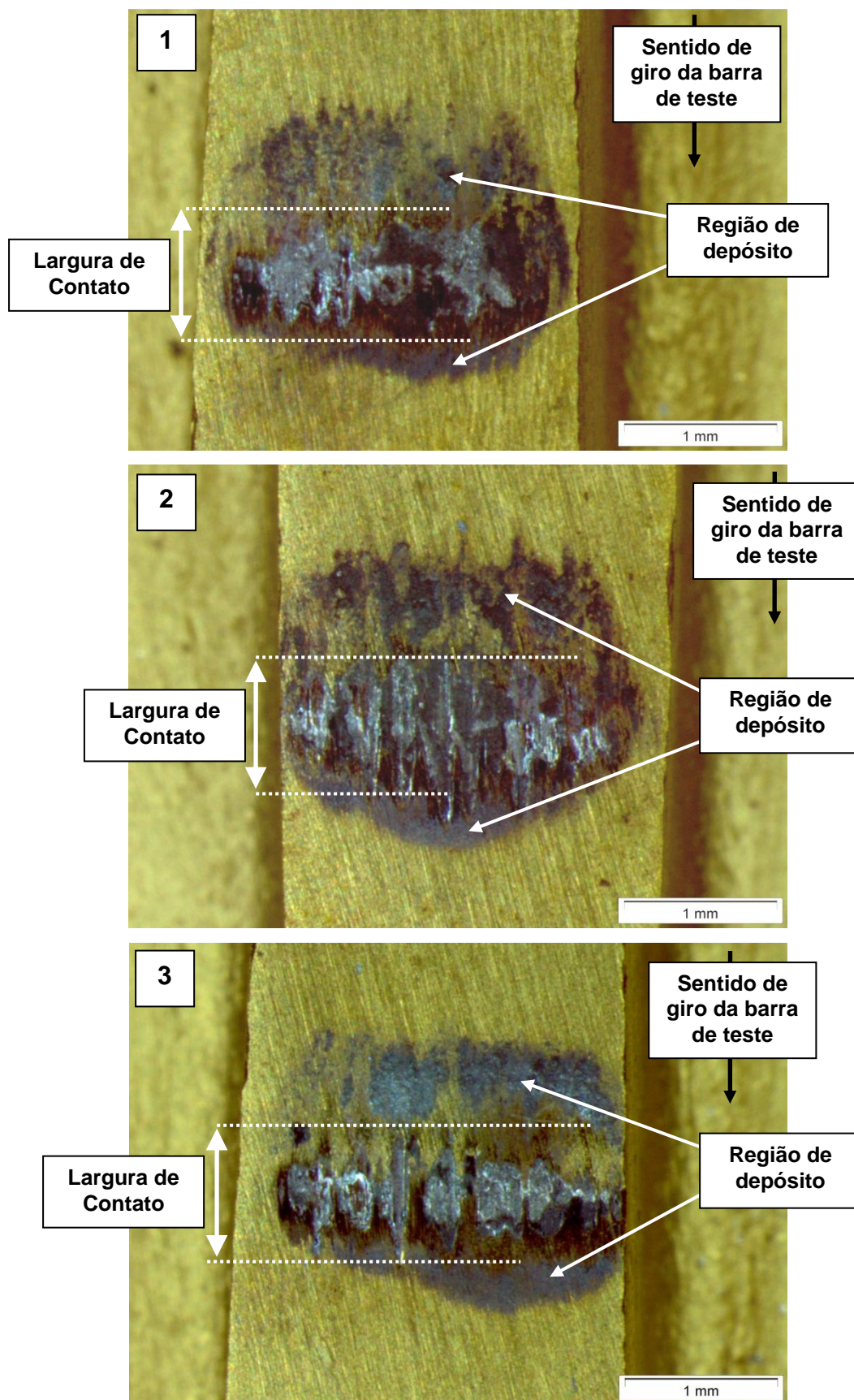


Figura 53 – Região do contato para as amostras lixadas na granulometria 600

Fonte: Autoria Própria

A seguir são apresentadas as evoluções no tempo das curvas de tendência das forças normal e de atrito, e do coeficiente de atrito, respectivamente.

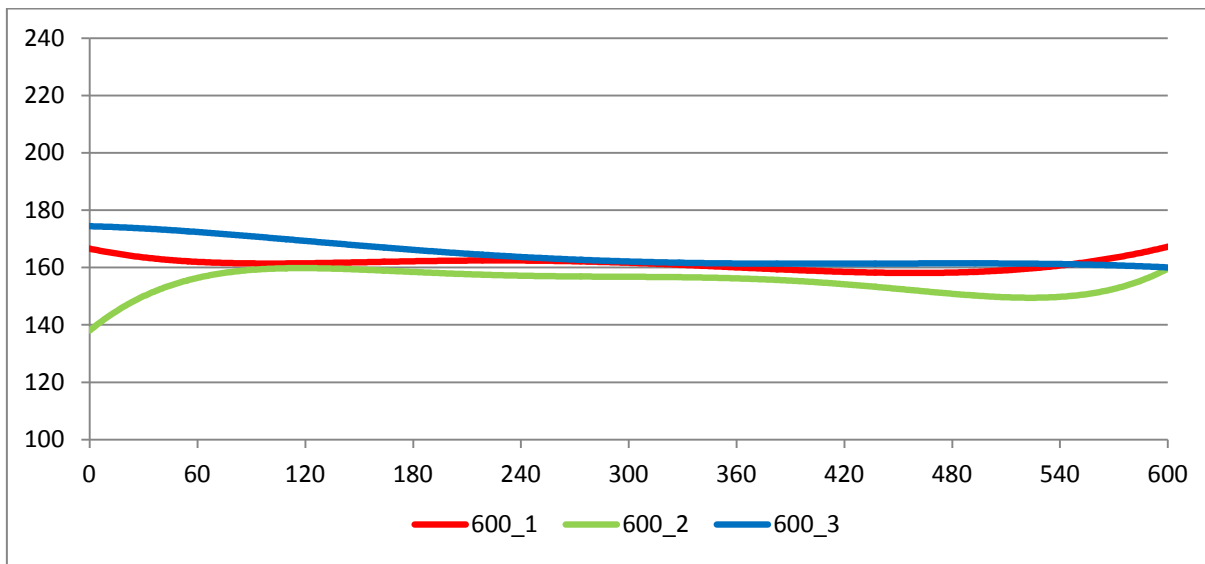


Gráfico 14 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) da força normal (N)

Fonte: Autoria Própria.

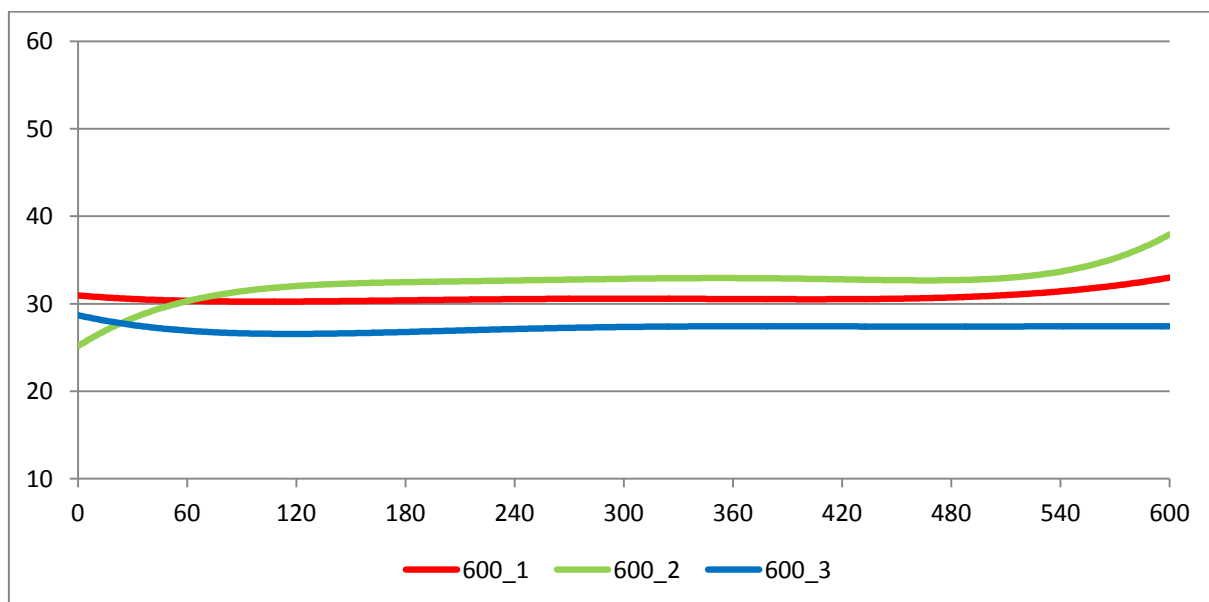


Gráfico 15 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) da força de atrito (N)

Fonte: Autoria Própria.

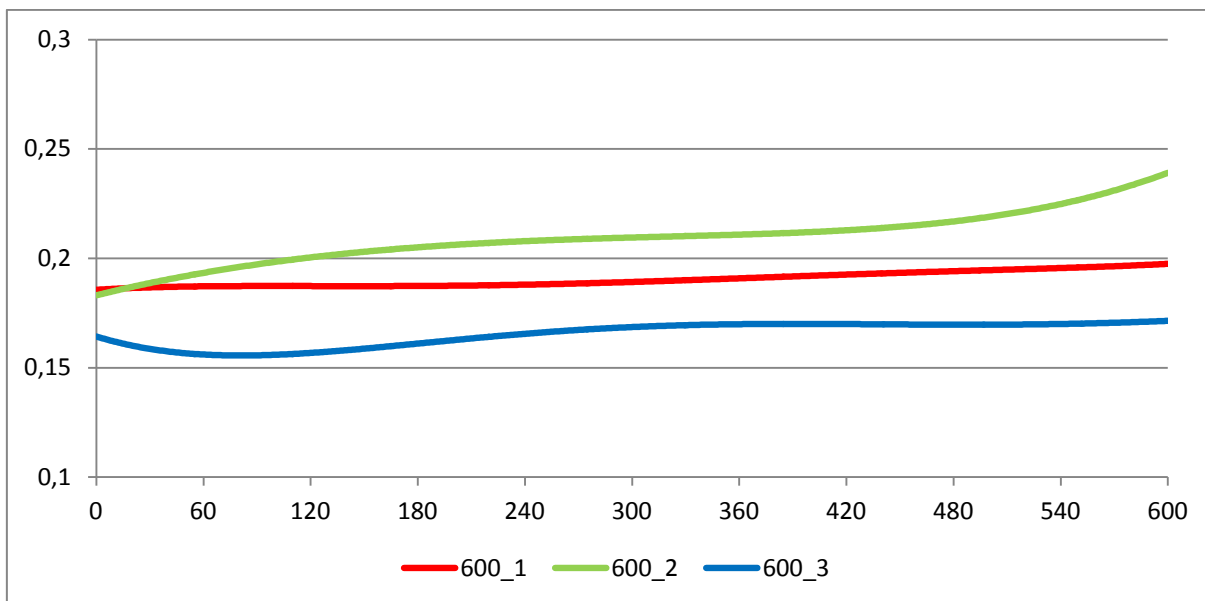


Gráfico 16 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) do coeficiente de atrito

Fonte: Autoria Própria.

A partir do Gráfico 14 é possível observar que a média da força permaneceu em torno de 160 N para as três amostras, e assim como anteriormente, algumas flutuações ocorreram devido ao ajuste da força aplicada através do carro transversal do torno.

Assim, foi possível estimar que a pressão normal média de contato para as três amostras ficou em torno de 75 MPa, mantendo-se levemente superior àquela estimada através da literatura.

Por fim, as três amostras apresentaram tendência de crescimento da força e do coeficiente de atrito ao longo do ensaio, embora essa tendência tenha se apresentado de forma sutil para as amostras 1 e 3, conforme os Gráficos 15 e 16.

4.2.2.3 Amostras Preparadas por Polimento

As Figuras 54 e 55 apresentam as regiões de contato para as amostras testadas. Novamente se observa que o revestimento de nitreto de titânio foi severamente arrancado, expondo uma considerável região das camadas inferiores.

Neste sentido, nota-se uma considerável largura para a região arrancada de maneira uniforme, ou seja, em quase toda a extensão do contato. Da mesma forma que para as amostras lixadas na granulometria 600, são quase inexistentes as

regiões de desgaste que não se encontram conectadas entre si. Além disso, estas regiões apresentam tanto o aspecto regular quanto o aspecto irregular.

Ainda, pode se observar novamente a diferença de desempenho entre amostras do mesmo grupo de rugosidade. Assim, a amostra 1 apresentou o melhor desempenho – menor região de desgaste, enquanto a 3, o pior – maior região de desgaste.

De modo geral, também é observado o depósito de material à superfície das amostras preparadas por polimento.

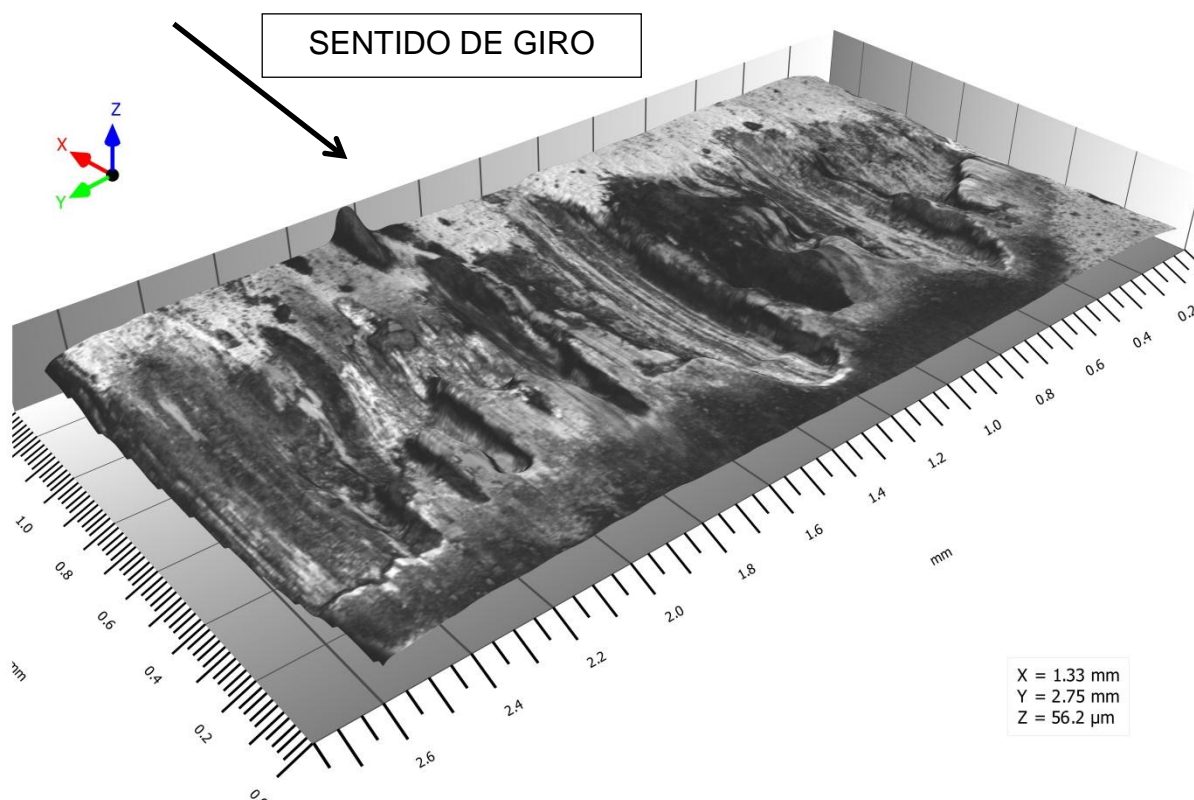


Figura 54 – Reconstrução 3D da região do contato da amostra 3 (ampliação do eixo z em 7%)

Fonte: Autoria Própria.

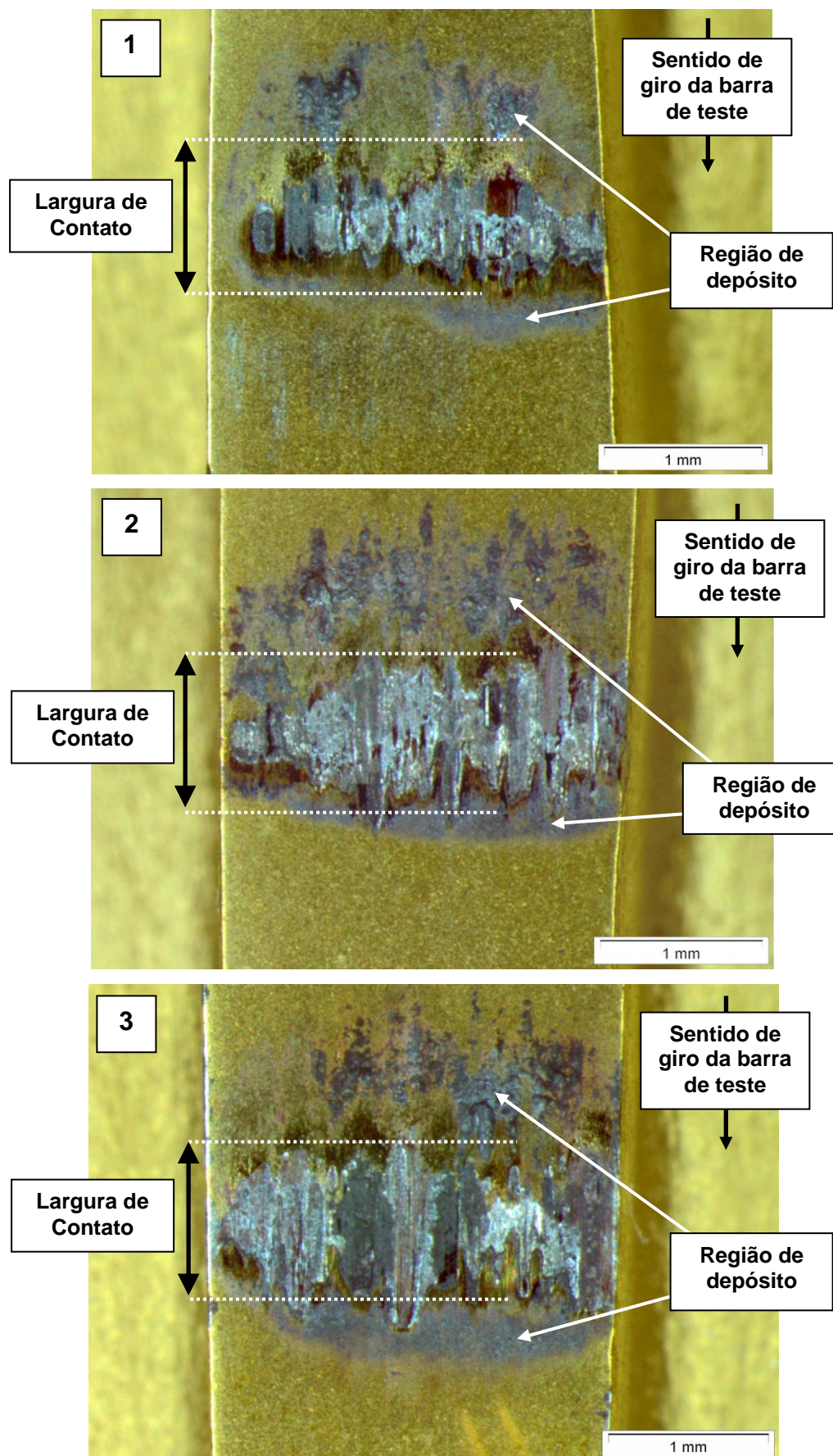


Figura 55 – Região do contato para as amostras polidas

Fonte: Autoria Própria.

A seguir são apresentadas as evoluções no tempo das curvas de tendência das forças normal e de atrito, e do coeficiente de atrito, respectivamente.

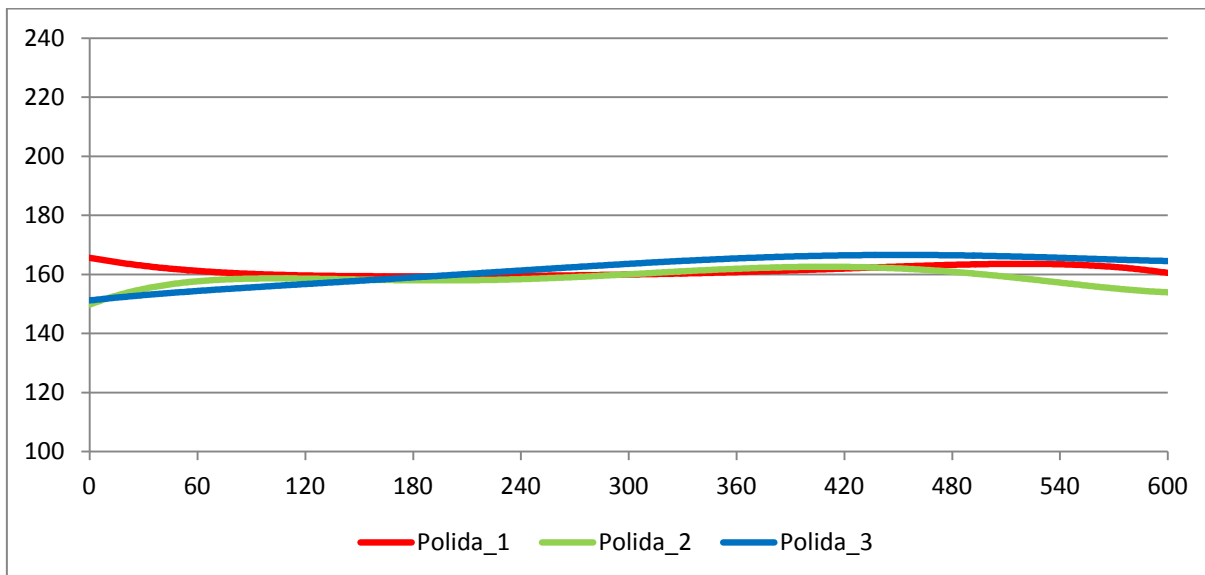


Gráfico 17 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) da força normal (N)

Fonte: Autoria Própria.

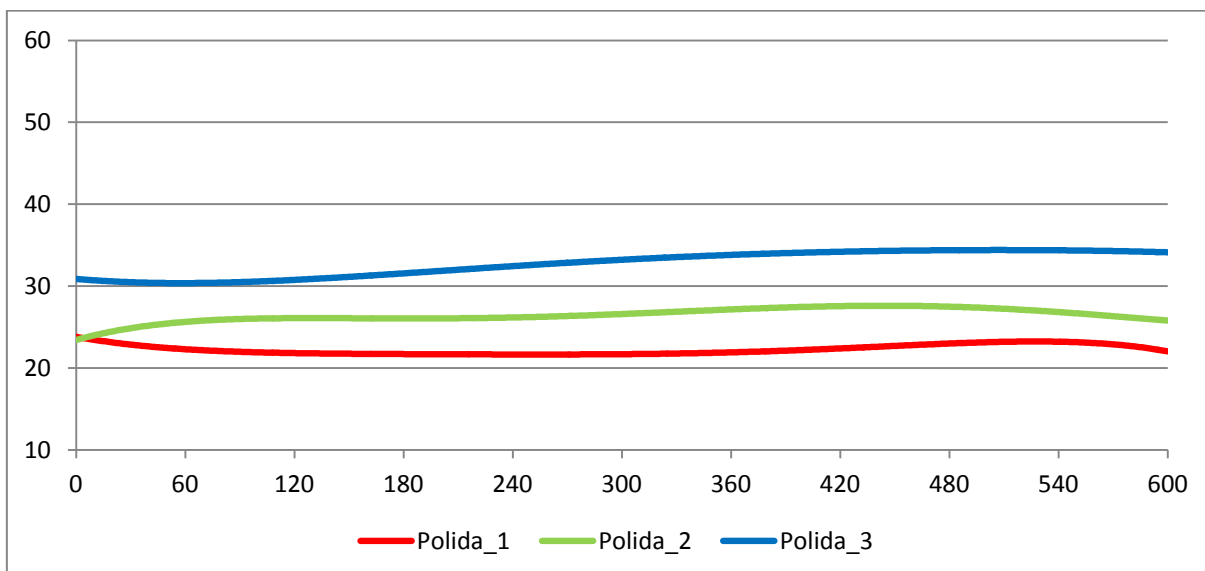


Gráfico 18 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) da força de atrito (N)

Fonte: Autoria Própria.

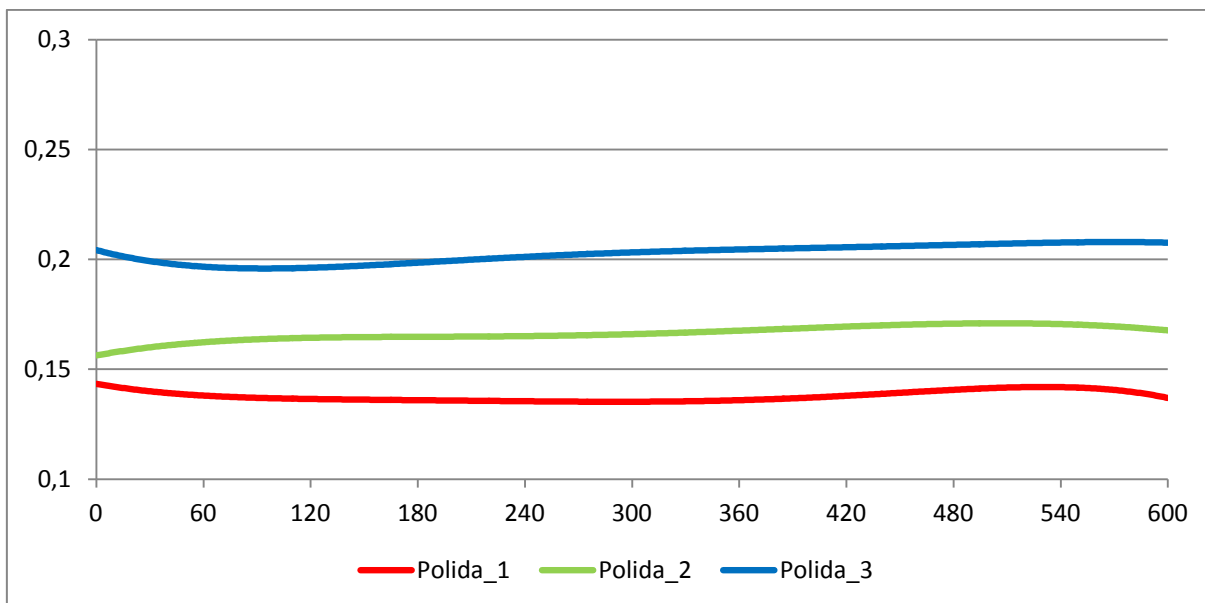


Gráfico 19 – Evolução no tempo (s) da curva de tendência (polinômio do 5º grau) do coeficiente de atrito

Fonte: Autoria Própria.

A partir do Gráfico 17, é possível observar a evolução no tempo da força normal aplicada para todas as amostras. Novamente, a média da força permaneceu em torno de 160 N, e algumas flutuações foram observadas. Desta forma, foi possível estimar a pressão normal média de contato para as três amostras, a qual novamente se encontra em torno de 75 MPa, levemente superior àquela estimada através da literatura para o contato ferramenta-peça.

Por fim, as três amostras apresentaram pequena tendência de crescimento da força e do coeficiente de atrito ao longo do ensaio, conforme apresentado nos Gráficos 18 e 19.

4.2.2.4 Comparação entre as Amostras Preparadas na Granulometria 220 e por Polimento

A Figura 56 apresenta todas as amostras ensaiadas para os grupos de rugosidade gerados a partir do lixamento em granulometria 220 e do polimento.

Observa-se que a região desgastada para as amostras polidas é consideravelmente maior que para as amostras lixadas. Isto demonstra que rugosidades mais elevadas conferem maior adesão da camada de nitreto de titânio à

camada nitretada, indo ao encontro dos resultados obtidos por Seika e Kowalski (2014) em testes de penetração Rockwell C.

Ainda, a diferença de desempenho entre os grupos de rugosidade pode ser avaliada pela topografia das superfícies, apresentado a partir das Figuras 57 e 58, para a amostra menos desgastada dentre as lixadas na granulometria 220 e para a amostra mais desgastada dentre as polidas. Assim, a profundidade de desgaste desta alcançou 35 μm , enquanto daquela, 20 μm .

Além disso, pode se notar que as amostras lixadas apresentam maiores regiões de depósitos, possivelmente pela maior rugosidade e consequente presença de maiores vales.

As curvas de evolução no tempo do coeficiente de atrito das amostras lixadas e polidas são apresentadas no Gráfico 20. Nota-se a existência de uma tendência no padrão do formato das curvas para um mesmo grupo de rugosidade.

No cômputo global do ensaio, as amostras polidas – representadas pelas linhas contínuas – apresentaram menor variação no coeficiente de atrito quando comparada às amostras lixadas – linhas tracejadas. No entanto, ambos os grupos de rugosidade apresentam tendência de crescimento no valor do coeficiente.

Assim, durante aproximadamente os dois minutos iniciais de ensaio, há uma tendência de rápida e mais intensa variação para o coeficiente de ambos os grupos. No geral, esta variação se mostrou decrescente, estabilizando e permanecendo praticamente constante durante três minutos para as amostras polidas – até 300 segundos – e cinco minutos para as amostras lixadas – 420 segundos.

Desta maneira, para as amostras polidas, o valor do coeficiente de atrito cresceu a partir do quinto minuto de ensaio, atingindo o seu valor máximo entre o oitavo e nono minutos, e tornando a cair no minuto final. Em contra partida, as amostras lixadas apresentaram crescimento no valor do coeficiente de atrito a partir do sétimo minuto, tendo o máximo atingido ao término do ensaio, haja vista que não tornaram a apresentar queda.

Por fim, destaca-se a dispersão para os valores obtidos de coeficiente de atrito. Ao contrário das amostras lixadas, cujas curvas se concentraram próximas uma da outra, as amostras polidas apresentaram considerável dispersão. Apenas uma curva se manteve no mesmo patamar daquelas obtidas para as amostras lixadas. Das duas outras, uma curva ficou acima e outra abaixo do patamar.

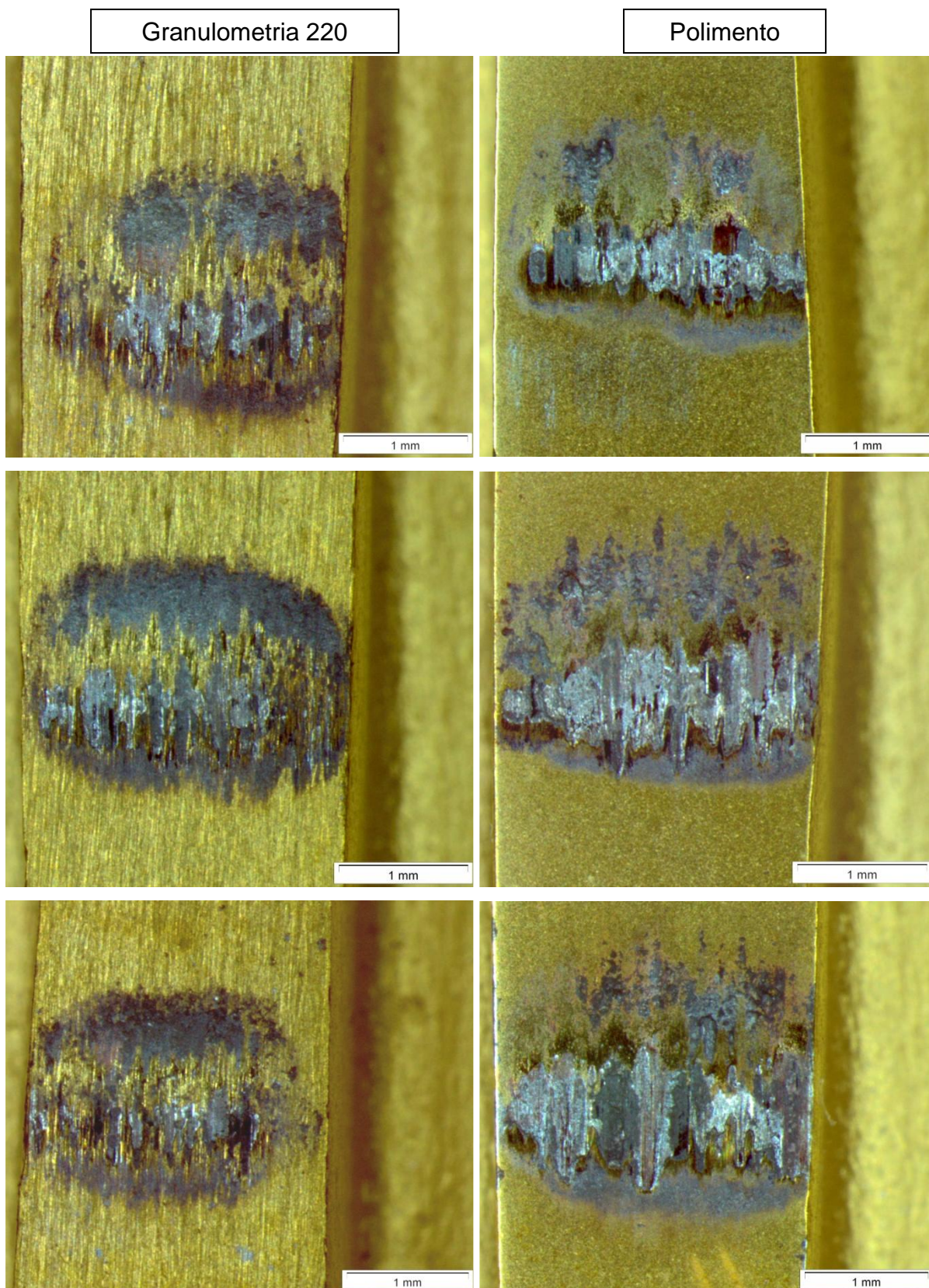


Figura 56 – Comparação entre as amostras preparadas na granulometria 220 (à esquerda) e por polimento (à direita)

Fonte: Autoria Própria.

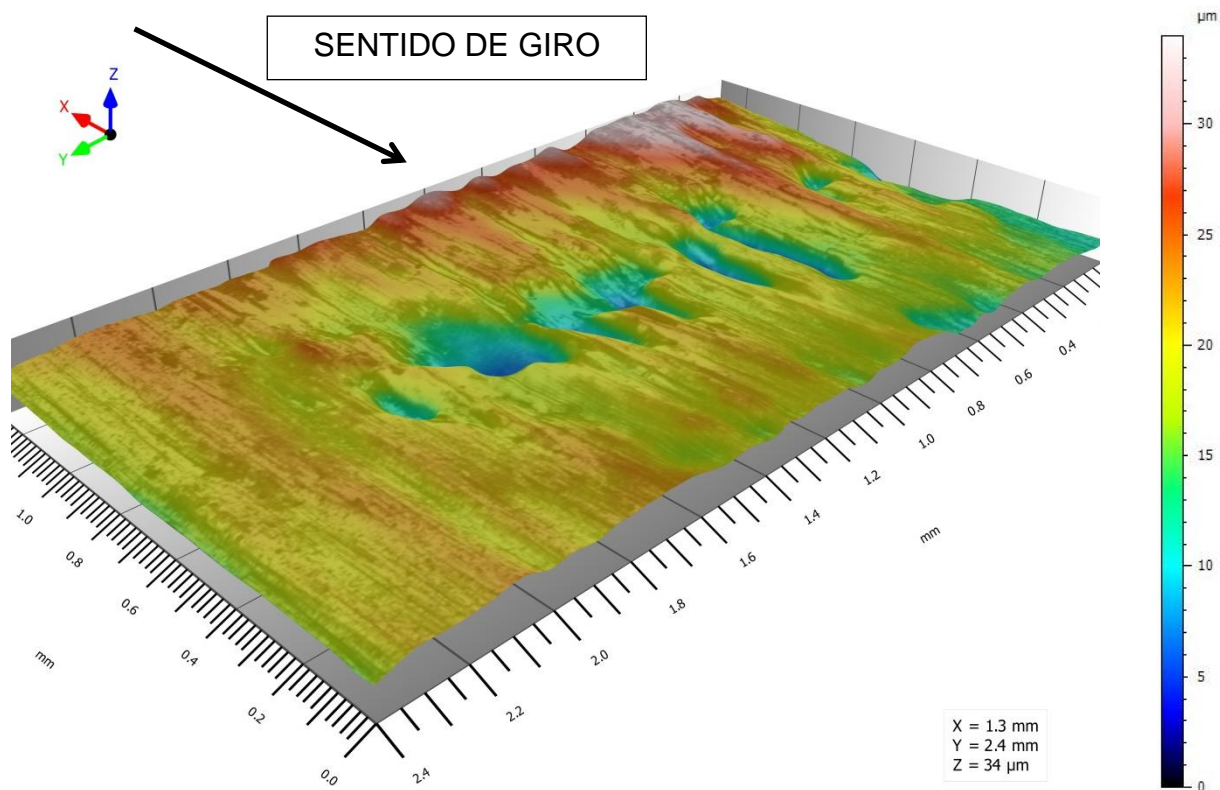


Figura 57 – Reconstrução 3D da região do contato da amostra 220-3 (ampliação do eixo z em 7%)

Fonte: Autoria Própria.

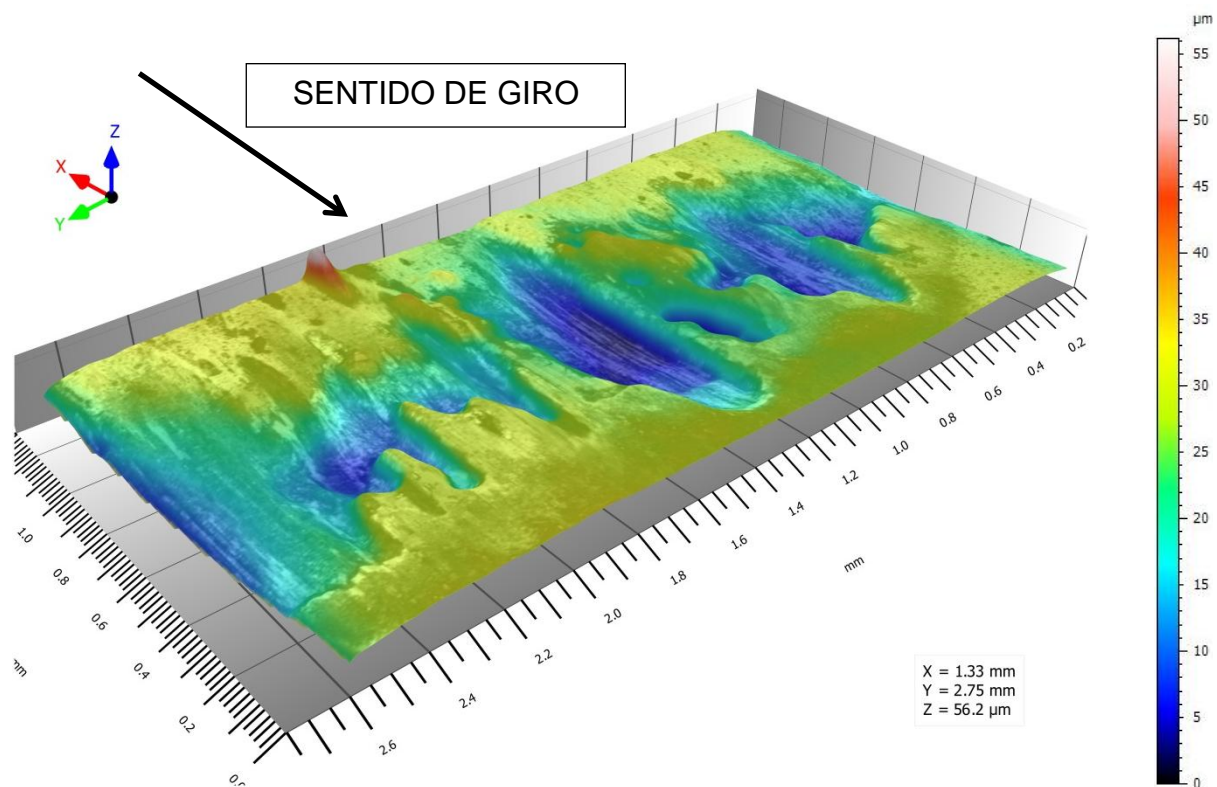


Figura 58 – Reconstrução 3D da região do contato da amostra Polida-3 (ampliação do eixo z em 7%)

Fonte: Autoria Própria.

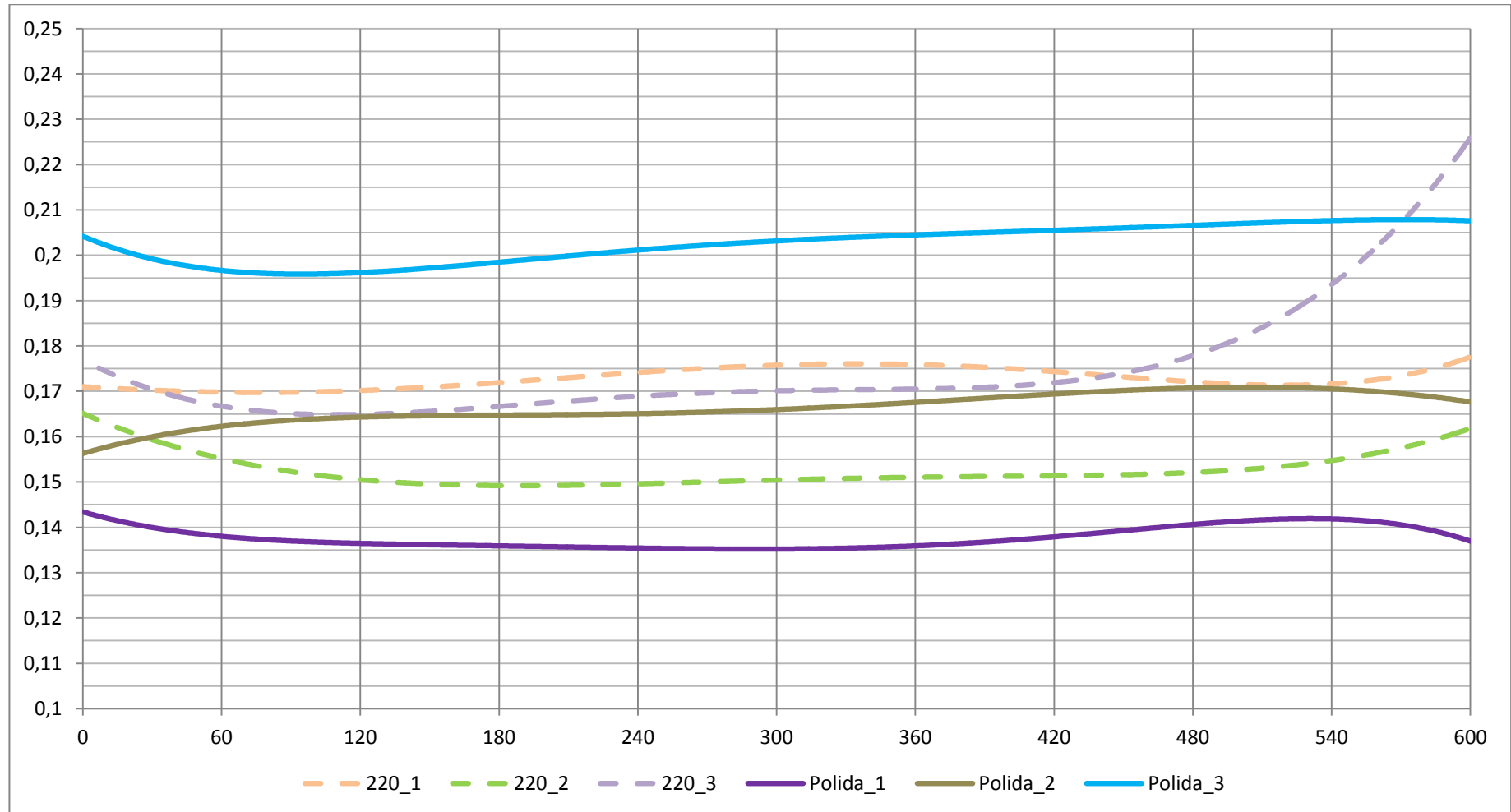


Gráfico 20 – Curvas de tendência para evolução no tempo (s) do coeficiente de atrito das amostras lixadas na granulometria 220 e das amostras polidas

Fonte: Autoria Própria.

Por fim, apresenta-se um resumo qualitativo dos resultados obtidos através da comparação entre o desempenho das amostras preparadas por lixamento em granulometria 220 e por polimento.

Tabela 14 – Resumo qualitativo dos resultados através da comparação entre as amostras lixadas e polidas

Parâmetro	220	Polida
Grau de deslocamento do revestimento a partir de testes VDI 3198 realizado por Seika e Kowalski (2014)	Menor	Maior
Grau de arrancamento do revestimento a partir de ensaios no dispositivo	Menor	Maior
Profundidade da marca de desgaste	Menor	Maior
Varição do coeficiente de atrito no tempo	Maior	Menor
Dispersão das curvas de evolução do coeficiente de atrito no tempo	Menor	Maior

Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÕES

O dispositivo se mostrou sensível às diferentes condições de preparação das amostras. Tanto o sistema de aquisição de dados quanto as condições empregadas durante os ensaios se mostraram adequados e, portanto, capazes de reportar a influência da rugosidade na adesão da camada de nitreto de titânio. Para tanto, as condições recomendadas de operação para o dispositivo são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Condições recomendadas de operação para o dispositivo

Condições	
Rotação do Eixo Árvore	250 RPM
Velocidade de Deslizamento	20 m/min
Tempo de Deslizamento	10 minutos
Força Normal de Contato (aplicada pelo pistão)	160 N

Fonte: Autoria Própria.

As amostras preparadas por lixamento em granulometria 220 apresentaram o melhor desempenho quanto ao desgaste. Em contrapartida, as amostras polidas apresentaram o pior desempenho – maior área de desgaste. Tais resultados foram ao encontro daqueles obtidos por Seika e Kowalski (2014) através de ensaio VDI 3198.

As amostras polidas apresentaram pequena variação no valor do coeficiente de atrito durante os ensaios, além de uma queda para os instantes finais. De forma contrária, as amostras lixadas (220) apresentaram uma variação mais relevante, justamente nos instantes finais.

As amostras polidas, ao contrário das amostras lixadas (220), apresentaram considerável dispersão de seus resultados para o valor da força de atrito, e conseqüentemente, do coeficiente de atrito.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudo aprofundado sobre as amostras polidas a fim de identificar o motivo para a dispersão dos valores de coeficiente de atrito, haja vista que as amostras apresentaram a mesma tendência para o formato das curvas.

Quantificar o desempenho das amostras quanto ao desgaste através da medição da área ou do volume da região desgastada.

Projeto de automatização do controle da força normal aplicada, a fim de reduzir as flutuações devido ao ajuste manual.

REFERÊNCIAS

ABDELMONEIN, M. ES. The tribology of orthogonal finish machining – a review. *Wear*, v. 63, pp. 303-318, 1979.

AMORIM, Heraldo José de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/3791>>. Acesso em: 19 jun. 2014.

ASM. **Metals Handbook, Volume 16 – Machining**. 9. ed. ASM International, 1989.

BONANDI, Marcelo. **Estudo das condições de corte no torneamento do aço AISI M4 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.uninove.br/Paginas/Mestrado/Engenharia/mepDissertacoes2012.aspx>>. Acesso em: 18 jun. 2014.

CANGUNDO, Esmeraldo Miguel. **Avaliação experimental da condição tribológica no processo de corte por arranque de aparas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/dissertacoes/175038>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

CERVELIN, José Eduardo. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-28092009-152513/>>. Acesso em: 18 jun. 2014.

CORMIER, Denis. **Machining and Metalworking Handbook**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

DEMATTE, Evandro. **Desenvolvimento e avaliação das propriedades de insertos sinterizados de aço rápido AISI M2 para usinagem**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2006. Disponível em: <http://www.tede.udesc.br/tde_busca/processaPesquisa.php?listaDetalhes%5B%5D=284&processar=Processar>. Acesso em: 22 jan. 2015.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

DOS ANJOS, Adriano David; IHA, Alexandre Akira; FERNANDES, Rodrigo Bastos. **Estudo dos efeitos da nitretação por plasma do aço M2 como preparação para tratamento duplex**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

EDWARDS, R. **Cutting tools**. London: The Institute of Materials, 1993.

ESPANHOL, Victor. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Área de Concentração: Processos de Fabricação) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/14374>>. Acesso em: 19 jun. 2014.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. v.1. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FOX-RABINOVICH, G.S.; KOVALEV, A.I.; WAINSTEIN, D.L.; SHUSTER, L. Sh.; DOSBAEVA, G.K.. Improvement of 'duplex' PVD coatings for HSS cutting tools by PFPE (perfluoropolyether 'Z-DOL'). **Surface & Coatings Technology**, v. 160, pp. 99-107, 2002.

FRANCO JÚNIOR, Adonias Ribeiro. **Obtenção de revestimentos duplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GUO, Y.B.; CHOU, Y.K.. The determination of ploughing force and its influence on material properties in metal cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 148, pp. 368-375, 2004.

HOLMBERG, Kenneth; MATTHEWS, Allan. **Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering**. 2. ed. Elsevier, 2009.

JOHNSON, K. L. **Contact mechanics**. Cambridge: University Press, 1985.

KISTLER. **Instruction Manual: Quartz 3-Component Dynamometer Type 9265B**.

MALEKIAN, M.; MOSTOFA, M.G.; PARK, S.S.; JUN, M.B.G.. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, pp. 553-559, 2012.

MARINESCU, Ioan D.; ROWE, W. Brian; DIMITROV, Boris; INASAKI, Ichiro. **Tribology of abrasive machining processes**. New York: William Andrew, 2004.

MIRANDA, Nuno Miguel Coelho de. **Influência dos parâmetros de corte no torneamento de metal duro sinterizado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial). Faculdade de Tecnologia Senai CIMATEC, Salvador, 2010. Disponível em: <http://portais.fieb.org.br/portal_faculdades/nuno-miranda.html>. Acesso em: 18 jun. 2014.

MOTA, Paulo Rosa da. **Investigação do comportamento de ferramentas de aço-rápido no processo de rosqueamento interno em alta velocidade de corte**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Materiais e Processos de Fabricação). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/93>>. Acesso em: 19 jul. 2014.

NICKEL, J.; SHUAIB, A.N.; YILBAS, B.S.; NIZAM, S.M.. Evaluation of the wear of plasma-nitrided and TiN-coated HSS drills using conventional and Micro-PIXE techniques. **Wear**, v. 239, pp. 155-167, 2000.

NOGUEIRA, Romário Mauricio Urbanetto. **Obtenção e estudo de insertos sinterizados de aços rápidos AISI M2, M3/2 e T15**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004. Disponível em: <http://www.tede.udesc.br/tde_busca/processaPesquisa.php?listaDetalhes%5B%5D=88&processar=Processar>. Acesso em: 17 jan. 2015.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOUARI, M.; LIST, G.; GIROT, F.; GÉHIN, D.. Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, pp. 1436-1442, 2005.

OBBERG, Erik. **Machinery's Handbook**. 29. ed. New York: Industrial Press, 2012.

SAE. **Metals & Alloys in the Unified Numbering System**. 8. ed. SAE International, 1999.

SEIKA, André Gustavo; KOWALSKI, Guilherme. **Influência da rugosidade sobre a adesão do revestimento em aços rápidos M2 com tratamento duplex**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SILVA, Márcio Aurélio da. **Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/145>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

SILVA, Márcio Aurélio da. **Estudo do contato entre material da peça e superfície de folga da ferramenta de usinagem**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/4201>>. Acesso em: 28 mar. 2015.

SIKDAR, Sumit.K.; CHEN, Mingyuan. Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 128, pp. 210-215, 2002.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 7. ed. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

STEVENSON, R.. The measurement of parasitic forces in orthogonal cutting. **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, v. 38, pp. 113-130, 1998.

SUCHÁNEK, J.; JURČY, P.; STOLAŘ, P.; HNILICA, F.; HRUBÝ, V.. Surface characteristics of duplex coated P/M M2 grade high speed steel. **Proc. of the European PM 2001 Congress**, Nice, France, pp. 303-308, 2001.

TRENT, Edward; WRIGHT, Paul. **Metal cutting**. 4. ed. Butterworth Heinemann, 2000.

ZUM GAHR, Karl-Heinz. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier, Tribology Series, v. 10, 1987.

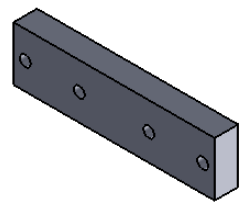
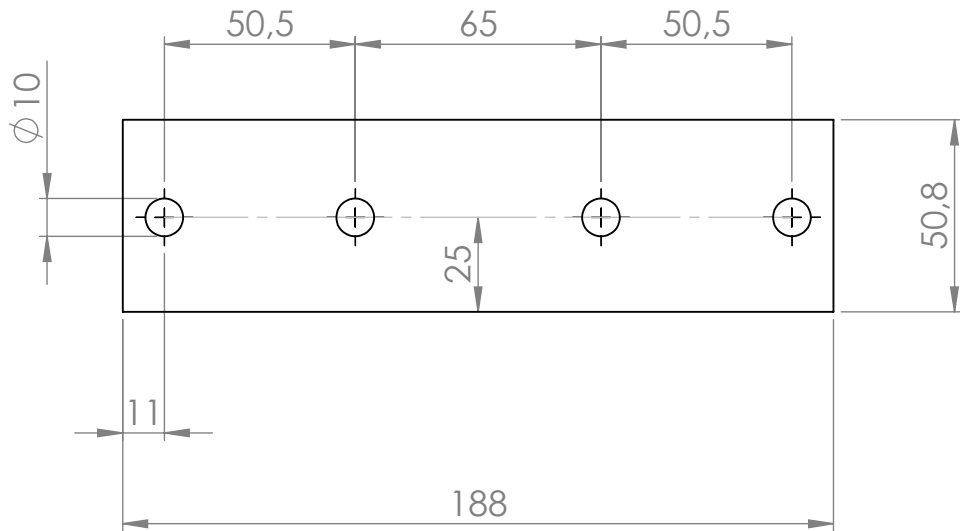
APÊNDICE I



A seguir são apresentados os desenhos de fabricação das peças do suporte de fixação da plataforma piezelétrica ao torno, acompanhado da lista dos demais componentes utilizados.

Tabela 01 – Componentes do suporte de fixação da plataforma piezelétrica ao torno

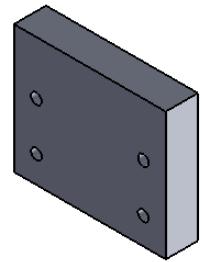
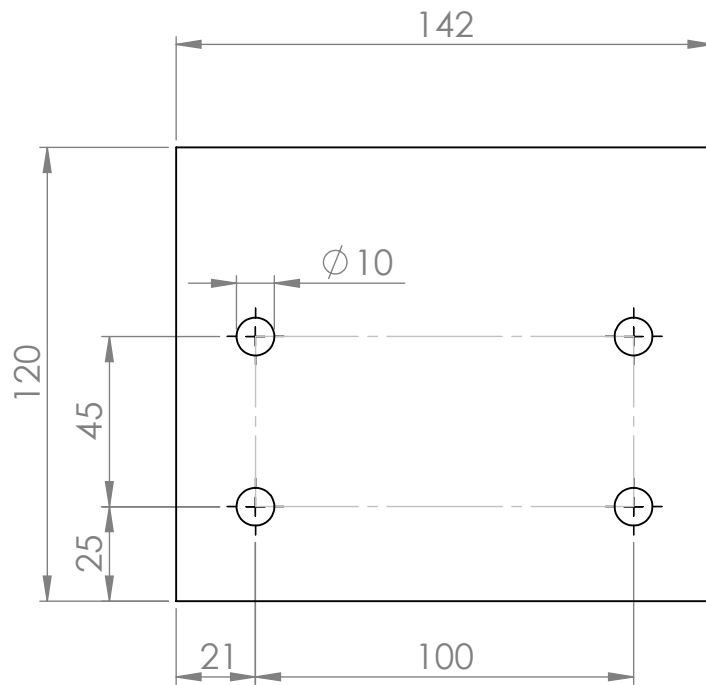
Componente	Quantidade	Descrição
Suporte Castelo	1	Desenho nº 1
Suporte Inferior do Carro Transversal	1	Desenho nº 2
Suporte Superior do Carro Transversal	1	Desenho nº 2
Aba Inferior	2	Desenho nº 3
Aba Superior	2	Desenho nº 3
Parafuso Cabeça Sextavada M10 x 75 mm	4	Fixação dos Suportes Inferior e Superior do Carro Transversal
Porca M10	4	
Barra Roscada M8 x 80 mm	8	Fixação da Plataforma Piezelétrica por meio das Abas Inferiores e Superiores
Porca M8	16	

Fonte: Autoria Própria

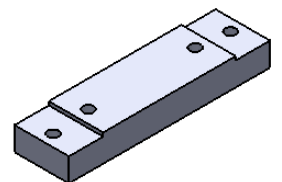
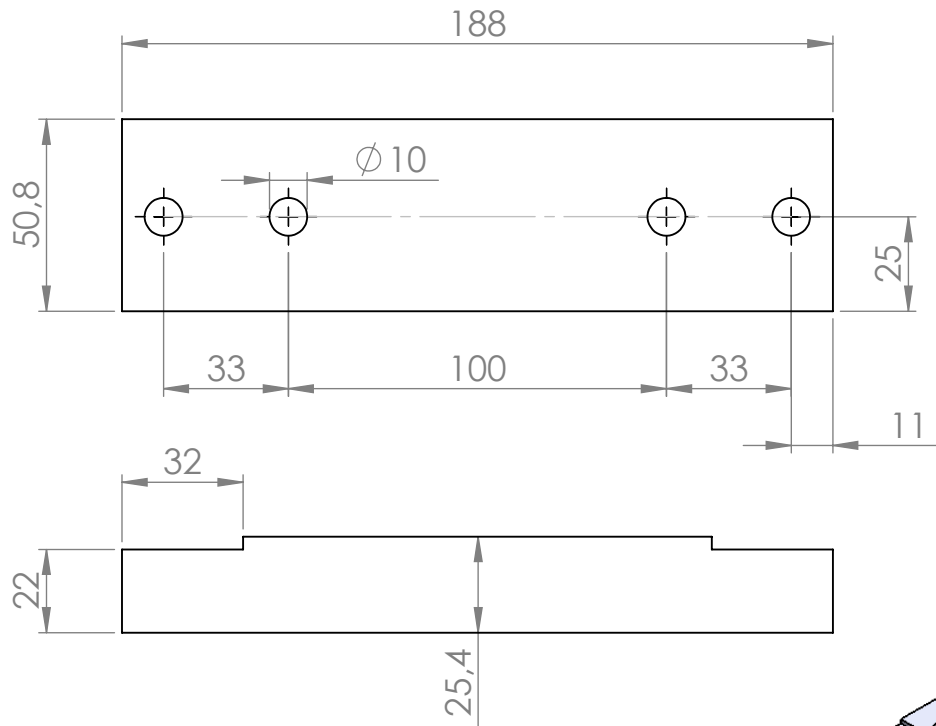




1	SUPORE CASTELO	01	AÇO ABNT 1020	ESPESSURA 22 mm
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE	mm
			DES. Nº	01
			DATA	27/12/2014
	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA		ALUNOS
			LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA MARCELO FRANCISCO HABOWSKI	
TCC - SUPORTE DE FIXAÇÃO DA PLATAFORMA PIEZELÉTRICA		ESCALA		
		1:2		

2

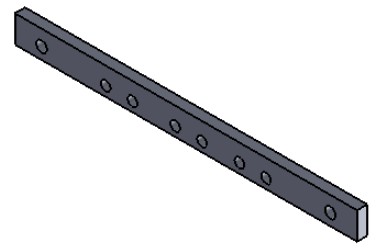
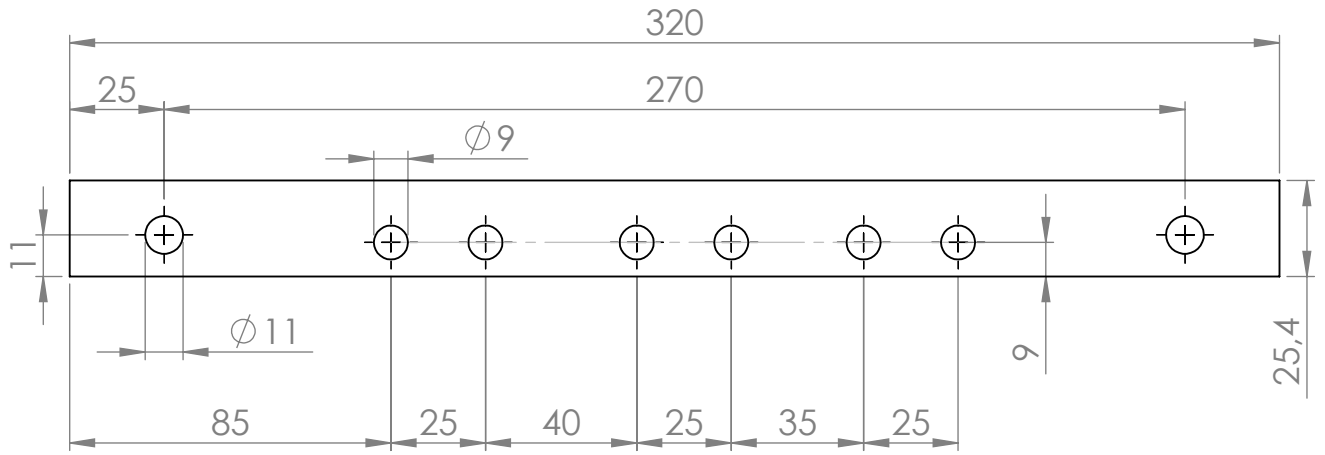


3

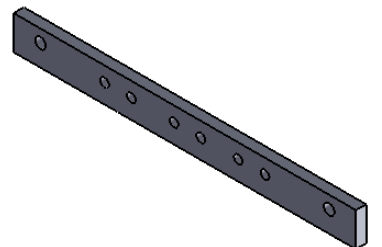
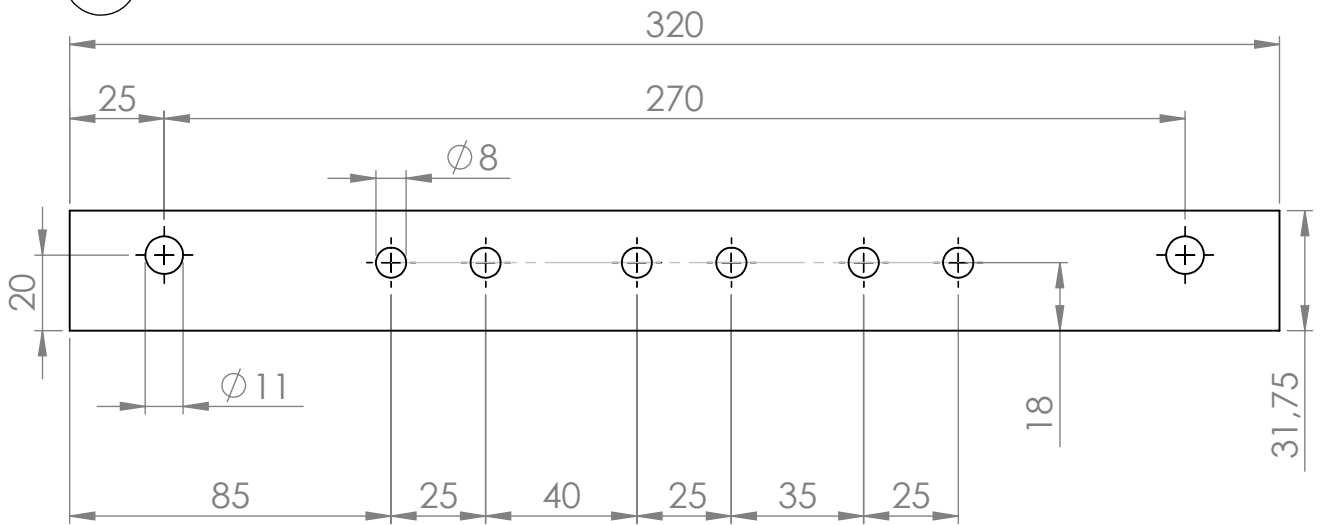


3	SUPORTE SUPERIOR CARRO TRANSVERSAL	01	AÇO ABNT 1020	
2	SUPORTE INFERIOR CARRO TRANSVERSAL	01	AÇO ABNT 1020	ESPESSURA 30 mm
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE	mm
			DES. Nº	02
			DATA	27/12/2014
	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA		ALUNOS
	TCC - SUPORTE DE FIXAÇÃO DA PLATAFORMA PIEZELÉTRICA		LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA MARCELO FRANCISCO HABOWSKI	
		ESCALA	1:2	
				

4



5

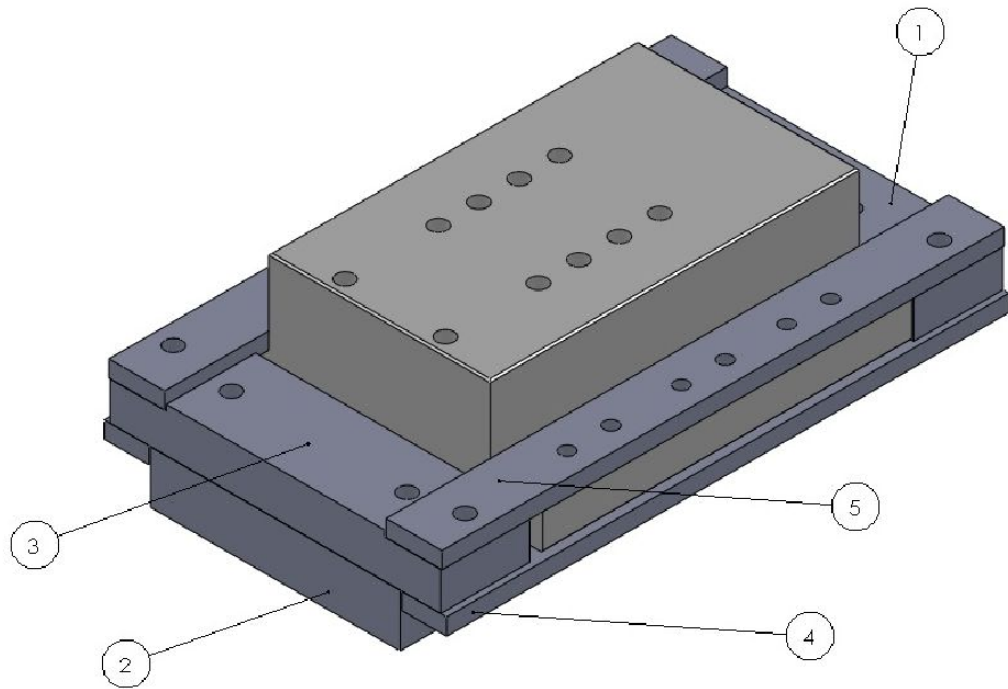


5	ABA SUPERIOR	02	AÇO ABNT 1020	ESPESSURA 3/8 pol
4	ABA INFERIOR	02	AÇO ABNT 1020	ESPESSURA 3/8 pol
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		UNIDADE	mm	DES. Nº	03
				DATA	27/12/2014

	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA	ALUNOS	LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA MARCELO FRANCISCO HABOWSKI
	TCC - SUPORTE DE FIXAÇÃO DA PLATAFORMA PIEZELÉTRICA		ESCALA	1:2





5	ABA SUPERIOR	02	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 3
4	ABA INFERIOR	02	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 3
3	SUPORE SUPERIOR CARRO TRANSVERSAL	01	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 2
2	SUPORE INFERIOR CARRO TRANSVERSAL	01	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 2
1	SUPORE CASTELO	01	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 1
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		UNIDADE	mm	DES. Nº	04
				DATA	27/12/2014
	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA		ALUNOS	
	TCC - SUPORTE DE FIXAÇÃO DA PLATAFORMA PIEZELÉTRICA		ESCALA		LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA MARCELO FRANCISCO HABOWSKI
					

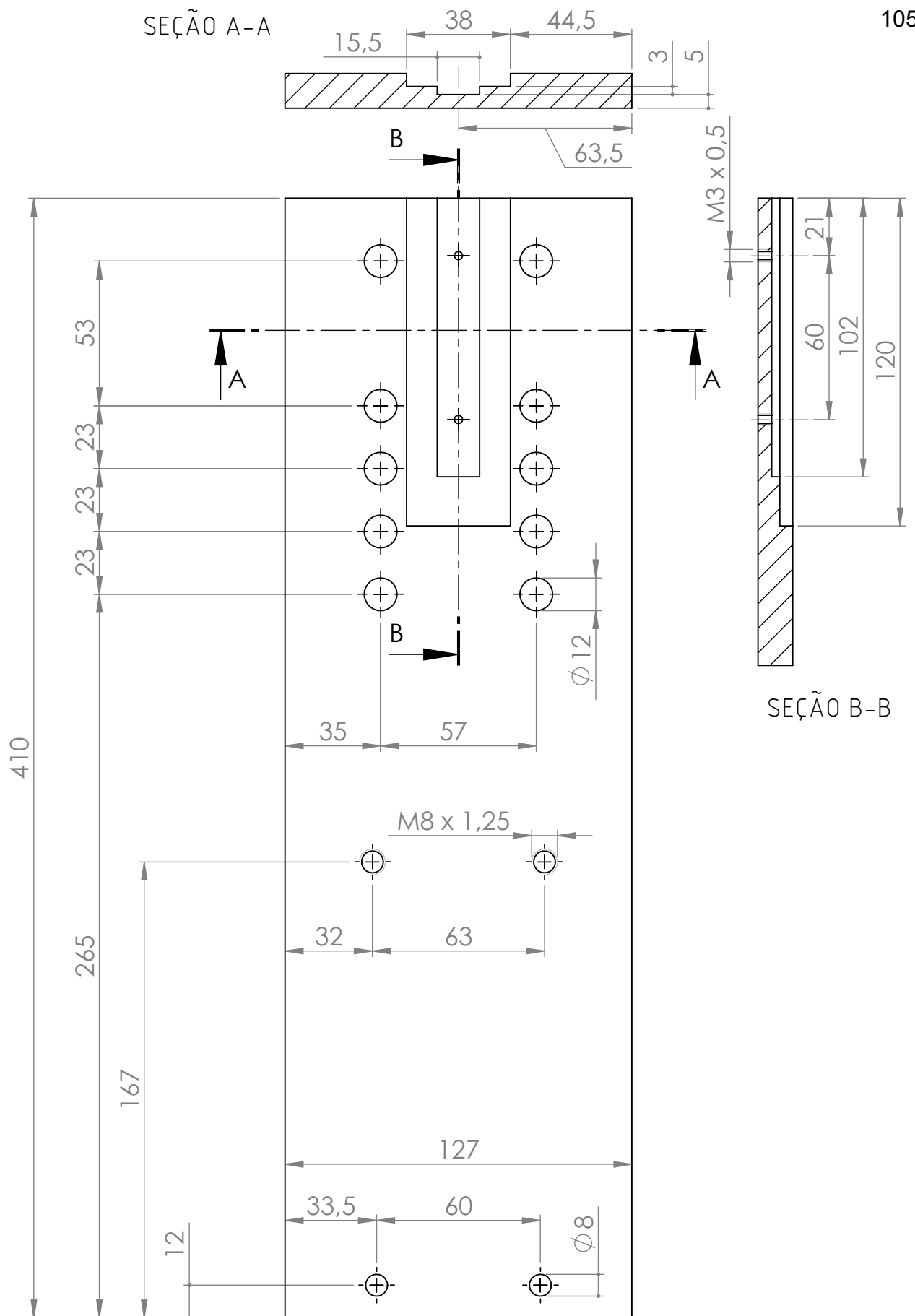
APÊNDICE II

A seguir são apresentados os desenhos de fabricação das peças do suporte de fixação das amostras, acompanhado da lista dos demais componentes utilizados.

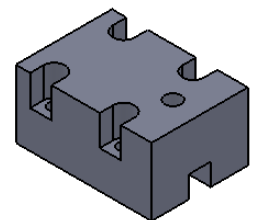
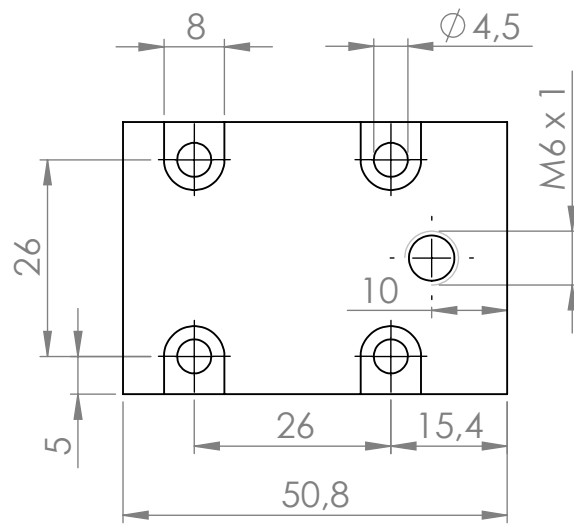
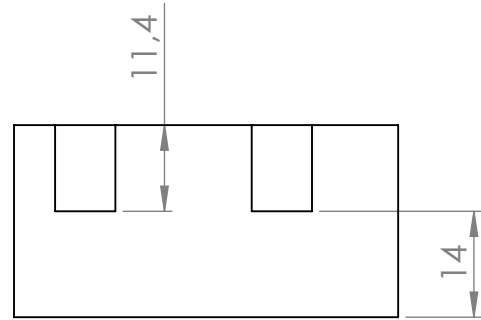
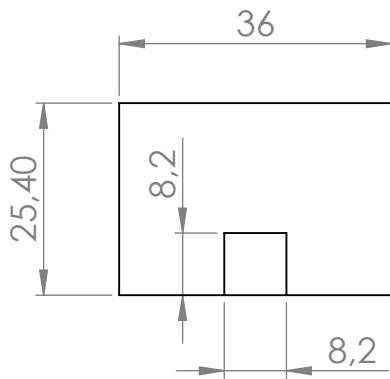
Tabela 01 – Componentes do suporte de fixação das amostras



Componente	Quantidade	Descrição
Chapa Suporte	1	Desenho nº 1
Porta Amostras	1	Desenho nº 2
Suporte do Trilho	1	Desenho nº 3
Suporte do Pistão	1	Desenho nº 3
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Sextavado Interno M12 x 20 mm	8	Fixação da Chapa Suporte e do Suporte do Trilho à Plataforma Piezelétrica
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Sextavado Interno M12 x 30 mm	2	
Guia Linear e Trilho	1	Guia Linear marca Hiwin modelo EGH15CA Trilho marca Hiwin modelo EGR15U
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Sextavado Interno M3 x 12 mm	2	Fixação do Trilho da Guia Linear à Chapa Suporte
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Sextavado Interno M4 x 20 mm	4	Fixação do Porta Amostra à Guia Linear
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Sextavado Interno M6 x 25 mm	1	Fixação da Amostra
Pistão Pneumático	1	Capacidade mínima de aplicação de força: 160 N
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Sextavado Interno M8 x 75 mm	2	Fixação do Pistão
Barra Roscada M8 x 80 mm	2	Fixação do Suporte do Pistão
Porca M8	4	

Fonte: Autoria Própria

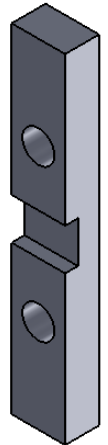
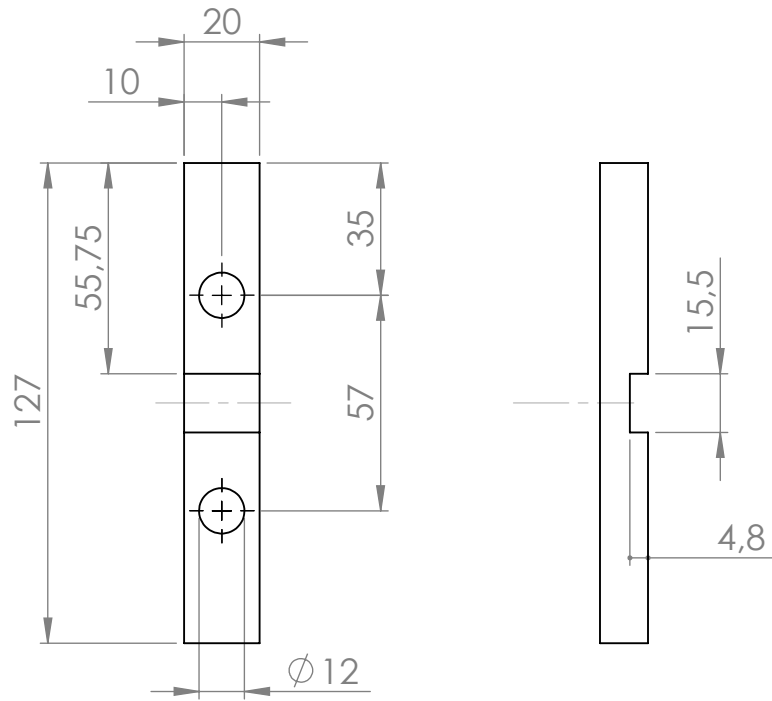


1	CHAPA SUPORTE	01	AÇO ABNT 1020	ESPESSURA 1/2 pol
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE	mm
			DES. Nº	01
			DATA	27/12/2014
	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA	ALUNOS	LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA
	TCC - SUPORTE DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS		ALUNOS	MARCELO FRANCISCO HABOWSKI
			ESCALA	1:2

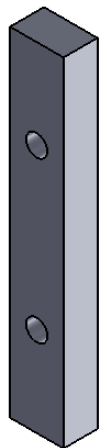
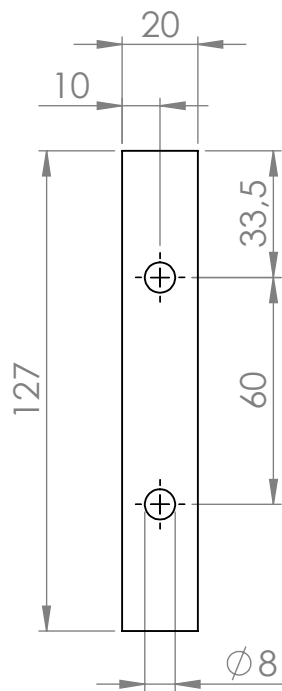




2	PORTA AMOSTRAS	01	AÇO ABNT 1020	CANAL 8,2 x 8,2 x 30
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE	mm
			DES. Nº	02
			DATA	27/12/2014
	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA		ALUNOS
			LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA MARCELO FRANCISCO HABOWSKI	
TCC - SUPORTE DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS			ESCALA	1:1
				

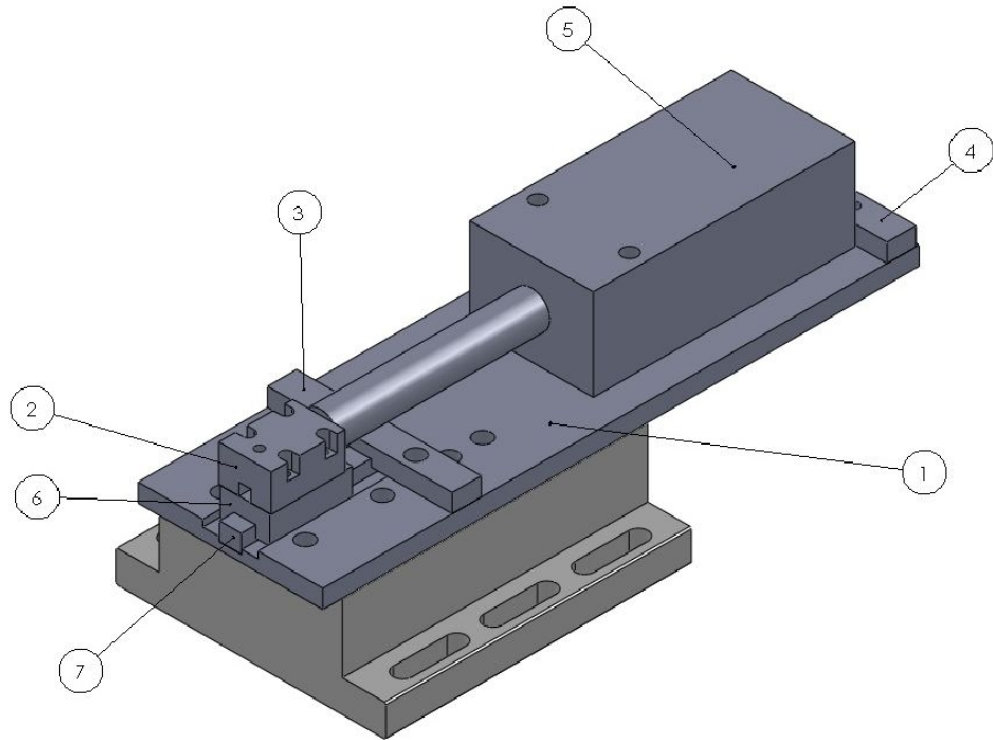
3




4



4	SUPORTE DO PISTÃO	01	AÇO ABNT 1020	ESPESSURA: 1/2 pol
3	SUPORTE DO TRILHO	01	AÇO ABNT 1020	ESPESSURA: 1/2 pol
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			UNIDADE	mm
			DES. Nº	03
			DATA	27/12/2014
	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA		ALUNOS
	TCC - SUPORTE DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS		ESCALA	LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA MARCELO FRANCISCO HABOWSKI
		1:2		



7	TRILHO	01		COMERCIAL
6	GUIA LINEAR	01		COMERCIAL
5	PISTÃO	01		COMERCIAL
4	SUPORE DO PISTÃO	02	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 3
3	SUPORE DO TRILHO	01	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 3
2	PORTA AMOSTRAS	01	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 2
1	CHAPA SUPORE	01	AÇO ABNT 1020	DESENHO Nº 1
PEÇA Nº	DENOMINAÇÃO	QUANT.	MATERIAL	OBSERVAÇÃO

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		UNIDADE	mm	DES. Nº	04
				DATA	27/12/2014
	CURSO	ENGENHARIA MECÂNICA		ALUNOS	LUIZ HENRIQUE SARTORI LIMA
	TCC - SUPORE DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS		ESCALA	MARCELO FRANCISCO HABOWSKI	
				