



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE CORPOS DE
PROVA PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA**

Por,

Vinícius Rodrigues Moraes Silva

12/0137968

Brasília, 23 de Novembro de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

PROJETO E FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

POR,

Vinícius Rodrigues Moraes Silva

12/0137968

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Lucival Malcher, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Leonel L. D. Morales, UDF (Coorientador)

Prof. Fábio Comes de Castro, UnB/ ENM

Prof. Edgar Nobuo Mamiya, UnB/ ENM

Brasília, 23 de Novembro de 2017

Agradecimentos

Primeiramente, devo agradecer à minha família, meu pai, minha mãe, minha irmã, meu avô e minha avó, cada um com seu papel me ajudaram a tornar tudo isso possível e que, apesar de tudo, sempre estiveram e sempre estarão ao meu lado em qualquer ocasião. Em seguida, devo agradecer ao professor Lucival que me orientou e guiou da melhor forma possível, ao professor Leonel, que além das orientações, se tornou um amigo e me proporcionou inúmeras oportunidades, principalmente a minha primeira experiência profissional. AO Fabrício, quase um tutor pra mim, me passou todo o conhecimento prático que tenho, extremamente necessário para esse trabalho. Ao UDF pela oportunidade de trabalho concedida e todo o apoio necessário à realização desse trabalho. À Bruna, minha namorada, que me apoiou e esteve ao meu lado todo o tempo.

Vinícius Rodrigues M. Silva

RESUMO

Esse trabalho visa projetar um conjunto de corpos de prova comumente usados em pesquisas. Desta forma, selecionou-se oito tipos para serem projetados e três para a fabricação, sendo eles: cilíndrico entalhado, cilíndrico vazados e de seção retangular de cisalhamento em máquina de tração. Os projetos obedeceram às normas vigentes e às características das máquinas disponíveis para a realização dos ensaios. Para a fabricação, foram utilizadas máquinas de comando numérico computadorizado e uma integração CAD/CAM que servirão como metodologia de base para a confecção dos outros tipos de corpo de prova. Foi feita uma qualificação metrológica das peças finalizadas, principalmente dos diâmetros dos cilíndricos, do comprimento da região do entalhe para o caso do corpo de prova de cisalhamento e da rugosidade em todos. Desta forma, observou-se que, usando uma correta metodologia de fabricação, alcança-se uma qualificação metrológica satisfatória, garantindo a qualidade dos dados obtidos nos ensaios.

Palavras chave: corpo de prova, comando numérico computadorizado, CAM, processos de fabricação, conferência metrológica.

ABSTRACT

This study aims to design a group of specimens commonly used in researches. In this way, eight types were selected to be designed and three for the manufacturing, being: notched cylindrical, leaked cylindrical and rectangular section of shear in traction machine. The projects obeyed the current standards and the characteristics of the available machines for carrying out the tests. For the manufacture, computerized numerical control machines was used and an integration between CAD/CAM which will serve as a base methodology to manufacture other types of specimens. A metrological qualification will be done in the finished pieces, in the diameter of the cylindrical, in the length of the notched region of the shear specimen and the roughness of all. Therefore, it was observed that thought a correct manufacture methodology, a satisfactory metrological qualification is reached, ensuring the quality of the dates obtained on the tests.

Key words: specimens, computerized numerical control, CAM, manufacture processes, metrology conference

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
1.2. OBJETIVO.....	14
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. IMPORTÂNCIA DA USINAGEM EM CNC.....	15
2.1.1. Torno CNC.....	16
2.1.2. Centro de Usinagem CNC.....	17
2.2. PARÂMETROS DE USINAGEM.....	18
2.2.1. Velocidade de corte.....	19
2.2.2. Avanço da Ferramenta.....	20
2.2.3. Velocidade de avanço.....	21
2.2.4. Avanço por dente.....	22
2.2.5. Profundidade de corte.....	22
2.3. PARÂMETROS METROLÓGICOS IMPORTANTES.....	23
2.3.1. Dimensões.....	24
2.3.2. Acabamento superficial.....	25
2.3.3. Excentricidade.....	28
2.4. TIPOS DE CORPOS DE PROVA E APLICAÇÕES.....	29
2.4.1. Corpo de Prova Cilíndrico Liso de Seção Cheia.....	29
2.4.2. Corpo de Prova Cilíndrico Entalhado.....	30
2.4.3. Corpo de Prova Cilíndrico Vazado.....	31
2.4.4. Corpo de Prova Retangular Entalhado.....	33
2.4.5. Corpo de Prova de Cisalhamento em Máquina de Tração.....	34
2.4.5.1. Retangular.....	34
2.4.5.2. Borboleta.....	35
2.4.6. Corpo de Prova de Arcan Modificado.....	36

2.4.7. Corpo de Prova de Falha Dupla.....	38
3. PROJETO E MODELAGEM DE CORPOS DE PROVA EM AMBIENTE CAM.....	40
3.1. GEOMETRIA E MATERIAIS DOS CP'S	40
3.2. DEFINIÇÃO DE FERRAMENTA E PARÂMETROS DE USINAGEM.....	42
3.3. CAMINHO DE USINAGEM E CÓDIGO G.....	45
4. METODOLOGIA DE CONFECÇÃO	48
4.1. CORPO DE PROVA ENTALHADO.....	48
4.2. CORPO DE PROVA VAZADO	53
4.3. CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO EM MÁQUINA DE TRAÇÃO.....	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1. CORPO DE PROVA ENTALHADO.....	62
5.2. CORPO DE PROVA VAZADO	65
6. CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	69
ANEXOS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região de origem da falha da aeronave <i>Comet G-ALYP</i> [3]	13
Figura 2 - Torno CNC modelo ENCO Concept Turn 105	16
Figura 3 - Componentes principais do torno CNC; a) Castanhas presas à placa móvel; b) Torre de ferramentas e contra-ponta	17
Figura 4 - Centro de usinagem CNC	18
Figura 5 - Componentes principais: a) Cabeçote; b) Magazine de ferramentas.....	18
Figura 6 - Avanço por dente [11]	22
Figura 7 - Tolerâncias em um corpo de prova entalhado	24
Figura 8 - a) Medição do comprimento da região da garra com um paquímetro e; b) Medição do diâmetro da seção útil do CP	25
Figura 9 - Símbolo de acabamento [15]	26
Figura 10 - Rugosímetro fazendo a leitura na região da garra	26
Figura 11 - Microscópio confocal de medição à laser Olympus OLS 4100	27
Figura 12 - Microscópio realizando a medida de rugosidade de um CP entalhado	27
Figura 13 - Mapeamento da superfície de um CP com entalhe de 5 mm.....	28
Figura 14 - Perfil gerado para a medida da rugosidade no entalhe	28
Figura 15 - Foto da seção transversal de um CP cilíndrico vazado excêntrico	29
Figura 16 - Dimensões do CP cilíndrico liso	29
Figura 17 - Dimensões do CP entalhado com raio de 14 mm	30
Figura 18 - Dimensões do CP entalhado com raio de 5 mm	31
Figura 19 - Dimensões do CP entalhado com raio de 3 mm	31
Figura 20 - Gradiente de tensão: a) CP cilíndrico liso de seção cheia; b) CP cilíndrico vazado	32
Figura 21 - Dimensões do corpo de prova vazado	32
Figura 22 – Corpos de prova retangulares entalhados [20].....	33
Figura 23 - Dimensões do corpo de prova retangular com entalhe de 10 mm de raio	34
Figura 24 - Diferentes profundidades de entalhe [20].....	34
Figura 25 - Dimensões do CP para ensaio de cisalhamento em máquina de tração	35

Figura 26 - Dimensões do corpo de prova borboleta	36
Figura 27 - Fixação na máquina de tração [20].....	37
Figura 28 - Dimensões do corpo de prova de Arcan modificado.....	37
Figura 29 - Sequência de fraturas [22]	38
Figura 30 - Dimensões do CP de falha dupla com entalhes de 1 mm de profundidade	39
Figura 31 - Forma de fixação dos CP's cilíndricos.....	40
Figura 32 - Modelagem do corpo de prova de cisalhamento em máquina de tração	41
Figura 33 - Parâmetros de corte para o desbaste de CP's cilíndricos	42
Figura 34 - Parâmetros de corte para o acabamento de CP's cilíndricos.....	43
Figura 35 - Definição da fresa de topo de 2 mm.....	44
Figura 36 - Definição da fresa de topo de 6 mm.....	45
Figura 37 - Caminhos de usinagem do CP cilíndrico vazado	45
Figura 38 - Caminhos de usinagem do CP cilíndrico entalhado	46
Figura 39 - Caminhos de usinagem do CP de cisalhamento em máquina de tração.....	46
Figura 40 – Caminhos de usinagem vistos em detalhe	47
Figura 41 - Trecho de um dos códigos gerados	47
Figura 42 - Corte do tarugo em serra de fita horizontal	48
Figura 43 - a) Faceamento da peça; b) Furo de centro.....	49
Figura 44 - Fixação do tarugo	49
Figura 45 - Primeiro passo do zero peça.....	50
Figura 46 - Coordenadas absolutas do zero peça	50
Figura 47 - Usinagem do corpo de prova.....	51
Figura 48 - CP após a usinagem.....	51
Figura 49 - Corte usando ferramenta de canal	52
Figura 50 – Polimento.....	52
Figura 51 - Fixação do CP cilíndrico vazado.....	53
Figura 52 - Início da usinagem com a broca de 10 mm	54
Figura 53 - Primeiro corpo de prova vazado obtido, com o furo visivelmente fora de centro.....	54

Figura 54 - Broca de 6 mm quebrada em três partes.....	55
Figura 55 - Sequência de brocas utilizada.....	56
Figura 56 - Alargador de 10 mm utilizado.....	56
Figura 57 - Fresa de ponta esférica de 10 mm	56
Figura 58 - CP cilíndrico vazado.....	57
Figura 59 - Corte da barra	58
Figura 60 - Usinagem do tarugo bruto	58
Figura 61 - Fixação da chapa	59
Figura 62 - a) e b) Determinação da coordenada em "y" da lateral da chapa; c) e d) Determinação das coordenadas do centro da chapa; e) e f) Determinação do zero peça.....	60
Figura 63 - Finalização do zero peça	61
Figura 64 - CP de cisalhamento em máquina de tração finalizado	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade de corte para torneamento recomendada pelo fabricante Sandvik [8]	20
Tabela 2 - Velocidade de corte para fresamento recomendada pelo fabricante CoroMill [9].....	20
Tabela 3 - Avanço para torneamento recomendado pelo fabricante Sandvik [10]	21
Tabela 4 - Avanço por dente recomendado pelo fabricante CoroMill [12]	22
Tabela 5 - Profundidade de corte para torneamento recomendada pelo fabricante Sandvik [13]..	23
Tabela 6 - Profundidade de corte para fresamento recomendada pelo fabricante CoroMill [13] ...	23
Tabela 7 - Composição química do aço SAE 4340.....	41
Tabela 8 - Composição química do aço inox 304L [24]	41
Tabela 9 - Parâmetros de corte utilizados na confecção dos dois primeiros CP's.....	62
Tabela 10 - Rugosidade obtida para os dois primeiros CP's	62
Tabela 11 - Conferência dimensional dos dois primeiros CP's	62
Tabela 12 – Parâmetros de corte utilizados na fabricação dos outros CP's	63
Tabela 13 – Rugosidade obtida para os outros CP's entalhados com raio de 5 mm.....	63
Tabela 14 – Conferência dimensional dos outros CP's entalhados com raio de 5 mm.....	63
Tabela 15 - Rugosidade dos CP's entalhados com raio de 3 mm	64
Tabela 16 - Conferência dimensional dos CP's entalhados com raio de 3 mm	64
Tabela 17 – Rugosidade dos CP's entalhados com raio de 14 mm.....	64
Tabela 18 – Dimensões dos CP's entalhados com raio de 14 mm.....	65
Tabela 19 - Parâmetros de corte utilizados na confecção dos CP's vazados	65
Tabela 20 - Conferência dimensional dos CP's vazados	66
Tabela 21 - Rugosidade dos CP's vazados	66

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

V_c	Velocidade de corte	[m/min]
f	Avanço	[mm]
V_f	Velocidade de avanço	[mm/rot]
f_z	Avanço por dente	[mm/rot.dente]
R_a	Rugosidade absoluta	[mm]
d_{max}	Diâmetro máximo	[mm]
d_{min}	Diâmetro mínimo	[mm]
R	Raio	[mm]
rpm	Rotações por minuto	
rot	Rotações	

Símbolos Gregos

ϕ	Diâmetro	[mm]
--------	----------	------

Subscritos

0	inicial
-----	---------

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Comando numérico computadorizado
CP	Corpo de prova

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao longo de toda a história da engenharia, registrou-se erros, principalmente de projeto, dos quais alguns provocaram grandes catástrofes. Um deles é a Torre de Pisa, o monumento italiano caracterizado por sua acentuada inclinação, onde os engenheiros não fizeram um estudo apropriado das propriedades do solo, o que resultou em uma instabilidade na base do edifício. Outro erro é a ponte pênsil de Tacoma, a qual oscilava transversalmente durante rajadas de vento. Essa peculiaridade fez dessa estrutura um ponto turístico depois de sua abertura ao tráfego rodoviário, porém, quatro meses depois, durante rajadas de vento de aproximadamente 64 km/h a estrutura falhou completamente. Por sorte, a única morte registrada foi de um cachorro [1].

Particularmente na engenharia mecânica, há registro de algumas catástrofes causadas por falhas nos projetos que levaram à morte de dezenas de pessoas. Uma das maiores já registradas foi a que causou os desastres aéreos do *Comet*. Em janeiro 1954, quase dois anos após entrar em serviço, ocorreu o primeiro acidente, o *Comet G-ALYP* decolou de Roma em direção à Londres, porém não chegou ao seu destino. A aeronave caiu no mar ao sul da ilha de Elba, causando a morte dos 24 passageiros e dos 6 tripulantes. Em abril do mesmo ano, ocorreu o segundo desastre. O *Comet G-ALYY* decolou de Roma com destino à cidade do Cairo. No dia seguinte, alguns destroços foram recolhidos no mar e nenhum dos 14 passageiros e 7 tripulantes foi encontrado vivo. Em ambos os acidentes, as condições meteorológicas eram excelentes para voos, o que aumentou a suspeita de que algo estava errado na estrutura da aeronave [2].

Para um estudo das causas desses acidentes, foram recolhidos os destroços do *G-ALYY* e, com a reconstrução da fuselagem, a falha foi rastreada até uma trinca no canto de uma janela no teto da cabine. Foram encontradas marcas de fadiga na superfície da fratura. Essas tinham começado na borda de um orifício escareado que tinha sido perfurado no revestimento para receber um fixador. A cada voo, a aeronave passava por um ciclo de pressurização e despressurização, gerando tensões axiais e circunferentes na fuselagem. Os *Comet G-ALYP* e *G-ALYY* tinham voado 1200 e 900 vezes, respectivamente, o que leva a conclusão que esse número de ciclos tinham gerado trinca por fadiga que, com o tempo, se tornara longa o suficiente para causar a fratura rápida [2] (Figura 1). Esse erro poderia ter sido evitado caso fossem feitos estudos mais aprofundados quanto à vida em fadiga do material utilizado.

Comet G-ALYP

Acidente em 10 de janeiro de 1954

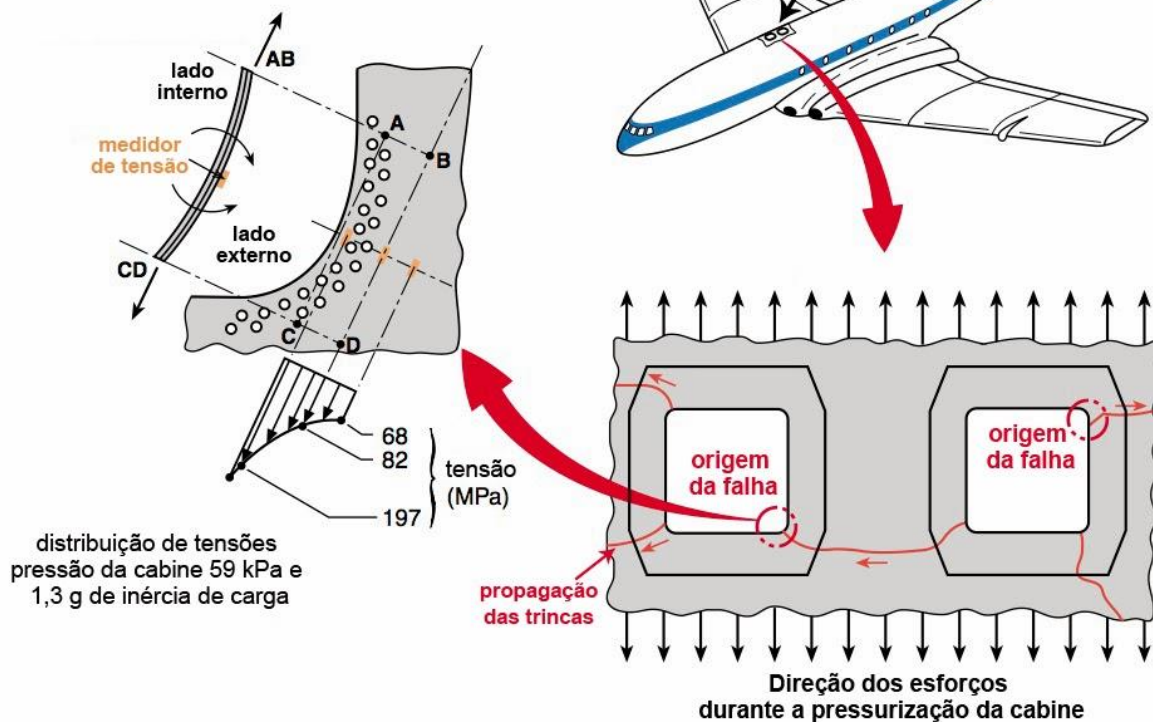


Figura 1 - Região de origem da falha da aeronave *Comet G-ALYP* [3]

Uma das formas de se conhecer mais a fundo as propriedades de cada material é através de testes em laboratórios com corpos de prova (CP). Essas são peças projetadas para serem ensaiadas até a falha (pode ser a ruptura completa, o aparecimento de uma trinca, entre outros, de acordo com o estudo que se deseja fazer), com o objetivo de se determinar alguma propriedade do material. Um dos tipos de espécimes é o cilíndrico liso que, quando tracionado uniaxialmente, por exemplo, é possível obter as propriedades básicas, como o módulo de elasticidade, tensão de escoamento, deformação de ruptura, coeficiente de Poisson. Porém, existem outros CP's mais específicos, desenvolvidos especialmente para determinar parâmetros que não são possíveis com o liso, como os entalhados, para mensurar a influência do nível de triaxialidade e os vazados, para obter as propriedades em cisalhamento.

Qualquer alteração inesperada na fabricação dos corpos de prova pode causar uma distorção nos dados gerados, como por exemplo, uma elevação excessiva na temperatura da barra durante a usinagem pode alterar a microestrutura do material ou uma falha no acabamento superficial da peça pode gerar um concentrador de tensão. A partir disso, a metodologia de confecção desses corpos de prova pode influenciar diretamente nos resultados que serão obtidos, se tornando assim, uma etapa importante no processo de pesquisa.

Outra etapa importante no processo é a conferência dimensional dos CP's, uma vez que valores maiores do que as tolerâncias pré-determinadas, em geral, irão diminuir a confiabilidade dos

resultados gerados. A aferição deve ser feita com equipamentos metroológicos de precisão, como micrômetro, paquímetro e microscópio de medição. Além das dimensões dos corpos de prova, deve-se atentar também à medição da rugosidade dos mesmos, pois esse aspecto influencia diretamente nos resultados dos ensaios, principalmente os de fadiga, os mais exigentes quanto à qualidade do acabamento superficial.

1.2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer uma metodologia que sirva como base para a confecção de corpos de prova para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais e determinar a influência dos parâmetros empregados no processo de usinagem no resultado final. Para isso, serão projetados oito diferentes tipos de corpos de prova e selecionados três para serem fabricados, de modo que serão analisados, ao final do processo de confecção, as dimensões principais do CP's e a rugosidade na região crítica, a fim de se garantir a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse projeto foi dividido em 6 etapas principais. Inicialmente, é apresentada uma contextualização mostrando a importância e os objetivos. Na sequência, tem-se uma revisão bibliográfica sobre as máquinas CNC utilizadas, dos vários tipos de corpo de prova existentes e dos parâmetros de conferência da qualidade final das peças, abordando as normas vigentes sobre o tema. Na terceira etapa, é mostrada a modelagem dos CP's utilizando programas CAM, onde serão obtidos os caminhos de usinagem, uma simulação desta e o código para ser interpretado pela máquina. Depois, é apresentada a metodologia para a confecção dos corpos de prova cilíndricos entalhados e vazados e dos de cisalhamento em máquina de tração com seção transversal retangular. A quinta etapa é a análise dos resultados, ou seja, a conferência dimensional das peças fabricadas e, por fim, tem-se uma conclusão, resumindo e abordando os pontos principais do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPORTÂNCIA DA USINAGEM EM CNC

A partir de 1955, a utilização do comando numérico passou a ser mais aceita com o advento do computador digital, tornando-se um comando numérico computadorizado. Foi quando se criou a primeira linguagem de programação de alto nível, Ferramenta Automaticamente Programada, do Inglês, Automatically Programmed Tool (APT). Todavia, surgiu outra complicação: era necessário um pós-processamento responsável por adaptar a programação a uma máquina-ferramenta específica [4].

Assim como anteriormente, quando surgiu o primeiro problema da tecnologia CN, com o avanço dos computadores, foi solucionada essa questão com advento do sistema de Manufatura Assistida por Computador, do inglês, Computer Aided Manufacturing (CAM), um programa que fornece um código geral que descreve os caminhos a serem percorridos pela ferramenta e o adapta para a máquina-ferramenta específica. Também devido à evolução da informática, surgiu a Manufatura Assistida por Computador, do inglês, Computer Aided Design (CAD), um programa destinado principalmente à representação de peças e máquinas [4]

Desta forma, seguindo a tendência evolutiva, criou-se uma integração CAD/CAM, onde o primeiro é responsável pela representação da peça, a qual, quando inserida no segundo, ele gerava os caminhos que a ferramenta percorreria para a fabricação da peça. Posteriormente, os programas CAM passaram a gerar os códigos que seriam lidos pelas máquinas CN, o que, a partir daí, passou a ser denominada CNC [5].

No século XX, o advento de ferramentas de aço rápido e, posteriormente, de carboneto de tungstênio, permitiu a usinagem de aços mais duros e outros materiais metálicos com alta produtividade. Depois da década de 40, os processos não convencionais de usinagem passaram a ganhar importância pela capacidade de produzir peças de geometria complexa em materiais de difícil usinabilidade, garantindo elevada qualidade [5].

Nessa linha, as máquinas com comando numérico computadorizado (CNC) surgiram devido à necessidade de se garantir competitividade entre os produtos nos mais diferentes aspectos, em especial quanto à perfeição no acabamento e nas dimensões, ao tempo de fabricação e ao custo. Com o avanço da tecnologia dos computadores, processadores e softwares, esse tipo de tecnologia vem evoluindo cada dia mais.

As maiores vantagens do uso do CNC são quanto à precisão e ao acabamento das peças. Com essas máquinas, é possível se fabricar peças com tolerâncias mais apertadas, com menor incidência de erros, conseqüentemente, um menor desperdício de materiais, uma redução dos custos operacionais, bem como uma maior longevidade da ferramenta quando comparado com os processos não automatizados de manufatura. Esse tipo de máquina é mais utilizado para produções em série, pois,

uma vez criado o programa da peça, estas podem ser produzidas rapidamente com uma geometria idêntica.

Para a confecção dos diferentes corpos de prova que serão descritos, deve-se fazer uso de duas máquinas diferentes. OS CP's de seção transversal circular poderão ser confeccionados em um torno CNC. Já os outros, retangulares, são possíveis de serem feitos apenas em um centro de usinagem CNC.

2.1.1. Torno CNC

O torno CNC é uma máquina operada basicamente para a construção de peças redondas ou cilíndricas. Nesse trabalho será utilizado o modelo ENCO Concept Turn 105 (Figura 2), dotado de dois eixos geométricos: X determina o diâmetro da peça e Z o comprimento, onde é possível fabricar peças de até 75 mm de diâmetro e 132 mm de comprimento, com uma precisão de 1 μ m. A fixação da barra é feita por castanhas presas à placa principal do torno (Figura 3 – a)), a qual é acoplada ao eixo central, chamado de eixo árvore. Para peças mais compridas, a fim de se evitar o arrancamento da mesma, é recomendado que seja feito um furo de centro na extremidade contrária à das castanhas e se utilize o contra-ponta (Figura 3 – b)). A usinagem é feita por pastilhas que são presas nos seus respectivos suportes, os quais são fixados na torre, nesse modelo, de 8 lugares (Figura 3 – b)). Essa torre se movimenta no eixo X e Z e a peça gira em torno do eixo Z. A lubrificação pode ser feita de forma manual ou inserida no programa para ser feita automaticamente. Essa máquina interpreta programas escritos com linguagem FANUC, os quais podem ser escritos manualmente com certa facilidade ou pode-se utilizar uma integração CAD/CAM, onde o próprio computador vai gerar o código.



Figura 2 - Torno CNC modelo ENCO Concept Turn 105

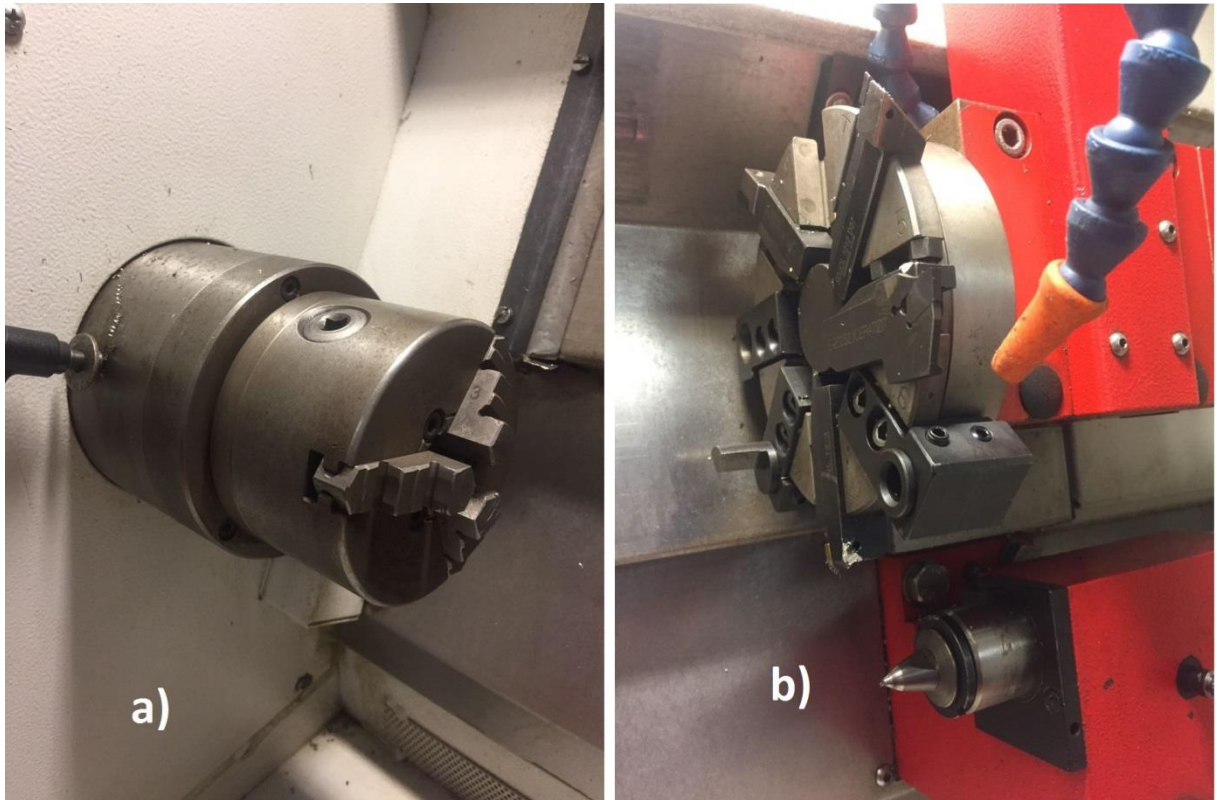


Figura 3 - Componentes principais do torno CNC; a) Castanhas presas à placa móvel; b) Torre de ferramentas e contra-ponta

2.1.2. Centro de Usinagem CNC

Nesse trabalho será utilizado um centro de usinagem CNC com eixo-árvore vertical, modelo MVU920 (Figura 4), no qual é possível confeccionar apenas peças planas e é dotado de três eixos: X e Y que determinam as dimensões da peça e Z a profundidade de corte da ferramenta. A fixação da peça é feita por uma morsa ou por um jogo de fixadores, a serem escolhidos de acordo com a operação desejada, os quais são presos à mesa. Esta se movimenta nos eixos X e Y por meio de barramentos e o cabeçote (Figura 5 – a)), onde ficam as ferramentas, no eixo Z. O carrossel (Figura 5 – b)) conta com 16 suportes de ferramentas. Assim como no torno, a lubrificação pode ser feita manualmente ou automaticamente no programa, o qual utiliza também linguagem FANUC. É recomendado que este seja feito utilizando um programa CAD/CAM devido à sua complexidade.



Figura 4 - Centro de usinagem CNC

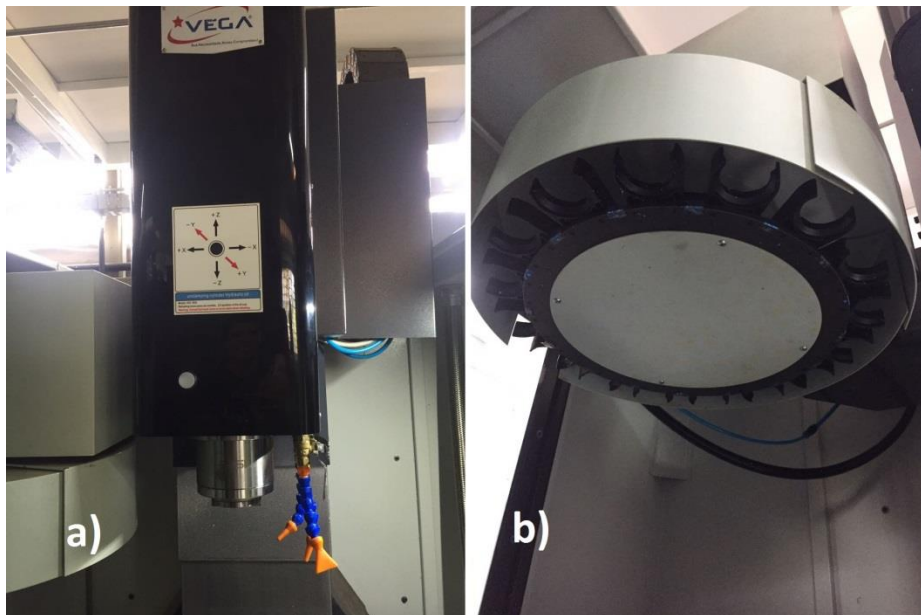


Figura 5 - Componentes principais: a) Cabeçote; b) Magazine de ferramentas

2.2. PARÂMETROS DE USINAGEM

Parâmetros de corte ou de usinagem, como são chamados, são grandezas numéricas que representam valores de deslocamento da ferramenta ou da peça, adequados ao tipo de trabalho a ser

executado, ao material a ser usinado e ao material da ferramenta, ou seja, são as variáveis definidas pelo operador que irão influenciar os quesitos mais importantes na usinagem: acabamento superficial, desgaste de ferramenta, tempo gasto e características do cavaco. Esses parâmetros ajudam a obter uma perfeita usinagem por meio da utilização racional dos recursos oferecidos por determinada máquina-ferramenta. Portanto, a combinação deles deve ser determinada experimentalmente, de modo a se obter os melhores resultados possíveis [5].

No presente caso, como não se busca uma produção em série, deve-se preocupar mais com a qualidade das peças produzidas do que o seu custo em si. Logo, procura-se o melhor acabamento superficial possível, mesmo que isso aumente significativamente o tempo gasto e o desgaste da ferramenta. A seguir, serão definidos os parâmetros mais importantes que serão utilizados na confecção dos corpos de prova.

2.2.1 Velocidade de corte

Juntamente com o avanço, esse é o parâmetro de corte mais importante na usinagem, uma vez que irá influenciar diretamente no acabamento superficial da peça. Experimentalmente, em geral, é observado que quando maior essa velocidade, menor será a rugosidade, porém, maior será o desgaste da ferramenta. Desta forma, a escolha da velocidade de corte correta é importantíssima tanto para a obtenção de bons resultados de usinagem quanto para a manutenção da vida útil da ferramenta e para o grau de acabamento [6].

A velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em relação à peça para as operações do tipo fresamento e furação. Já para o torneamento, é o contrário, é a resultante da rotação da peça em relação à ferramenta [7]. Esse parâmetro pode ser calculado pela equação (1):

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000}, \quad (1)$$

onde V_c é a velocidade de corte, em m/min, d é o diâmetro da ferramenta ou da peça, em mm e n é rotação da ferramenta, em rpm.

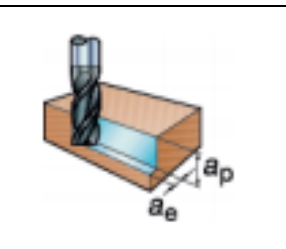
Geralmente, o fabricante da ferramenta recomenda uma faixa de velocidade de corte que o operador deve utilizar, de acordo com o material a ser usinado e a ferramenta utilizada, como podemos ver nas Tabela 1 e

Tabela 2.

Tabela 1 - Velocidade de corte para torneamento recomendada pelo fabricante Sandvik [8]

ISSO P N° MC	Aços	Dureza Brinell	Resistência ao desgaste	
			CT525	GC3115
		HB	Avanço (mm/rot)	
			0,05 - 0,5	0,05 - 0,5
Velocidade de corte (m/min)				
	Sem liga			
P1.1.Z.AN	C = 0,1 - 0,25 %	125	235 - 170	355 - 185
P1.2.Z.AN	C = 0,25 - 0,55 %	150	220 - 155	330 - 140
P1.3.Z.AN	C = 0,55 - 0,8 %	170	210 - 145	300 - 125
	Baixa liga < 5 %			
P2.1.Z.AN	Não endurecidos	180	205 - 145	290 - 135
P2.5.Z.HT	Endurecidos e temperados	275	185 - 120	270 - 105
P2.6.Z.HT	Endurecidos e temperados	350	150 - 100	220 - 85
	Alta liga > 5 %			
P3.0.Z.AN	Recozidos	200	130 - 100	260 - 115
P.3.0.Z.HT	Aços-ferramenta endurecidos	325	80 - 40	205 - 75
	Fundidos			
P1.5.C.UT	Sem liga	180	150 - 100	175 - 75
P2.6.C.UT	Baixa liga (elementos de liga < 5%)	200	135 - 85	200 - 90
P3.0.C.UT	Alta liga (elementos de liga > 5%)	225	115 - 70	160 - 75
P3.2.C.AQ	Aços-manganês 12 - 14% Mn	250	75 - 50	90 - 50

Tabela 2 - Velocidade de corte para fresamento recomendada pelo fabricante CoroMill [9]

ISSO	CMC	DUREZA HB	DUREZA HRC		Velocidade de corte (m/min)
					$a_e = 0,004d$ $a_p = 0,020d$
P	03.22	400			170
	03.22	450			150
K	08.1	200			265
	09.2	250			220
H	04.1		48		130
	04.1		52		120
	04.1		55		105
	04.1		58		70
	04.1		60		65
	04.1		62		60

2.2.2. Avanço da Ferramenta

Juntamente com a velocidade de corte, esse parâmetro é de fundamental importância na usinagem, pois também influencia diretamente o acabamento da peça e o tempo gasto, principalmente. É dito

avanço, o deslocamento que a ferramenta percorre após um giro da peça (torneamento) ou vice versa (fresamento e furação) [7]. É mais comumente usado para operações de torneamento e a unidade de medida padrão é mm/rot.

Quanto menor o avanço, melhor tende a ser o acabamento da peça, já que se retira menos material por giro. Porém, se o avanço for muito reduzido, o tempo gasto na confecção da peça aumentará significativamente, o que é extremamente indesejado, pois esse é diretamente proporcional ao custo de produção. Assim, os fabricantes de ferramenta também fornecem tabelas com os valores recomendados para os avanços, como podemos ver na Tabela 3.

Tabela 3 - Avanço para torneamento recomendado pelo fabricante Sandvik [10]

Pastilhas T-MAX P negativas com formato básico			
Pastilha	Avanço (mm/rot)		
	Recomendado	Mínimo	Máximo
WNMG080408-PM	0,30	0,15	0,50
WNMG080412-PM	0,35	0,18	0,60
WNMG080416-PM	0,40	0,23	0,65
CNMG120408-MM	0,25	0,10	0,45
CNMG120412-MM	0,30	0,10	0,60
CNMG120416-MM	0,37	0,10	0,65
CNMG160608-MM	0,25	0,10	0,45
CNMG160612-MM	0,30	0,10	0,60
CNMG160616-MM	0,37	0,10	0,65
CNMG190608-MM	0,25	0,10	0,45
CNMG190612-MM	0,30	0,10	0,60
CNMG190616-MM	0,37	0,10	0,65
DNMG110408-MM	0,25	0,10	0,45
DNMG110412-MM	0,30	0,10	0,60
DNMG110416-MM	0,25	0,10	0,45
DNMG150408-MM	0,30	0,10	0,60
DNMG150412-MM	0,25	0,10	0,45
DNMG150608-MM	0,30	0,10	0,60
SNMG120408-MM	0,25	0,10	0,45
SNMG120412-MM	0,30	0,10	0,60

2.2.3. Velocidade de avanço

Esse parâmetro é uma combinação da velocidade de corte e do avanço, como pode ser visto na Equação (2). Ele possui uma importância menor do que os dois, pois não será inserido diretamente no programa para confecção das peças. Para operações de torneamento e fresamento, a velocidade de avanço é dada pelo produto do avanço pela velocidade da ferramenta [7], de acordo com as Equações (2) e (3):

$$V_f = fn \quad (2)$$

$$V_f = 1000 \frac{V_c f}{\pi d}, \quad (3)$$

onde V_f é a velocidade de avanço, em mm/min, f é o avanço, em mm/volta e V_c e d como definidos na Equação (1).

2.2.4. Avanço por dente

Enquanto o avanço é mais usado para operações de torneamento, esse é comumente aplicado em fresamento e furação, pois, nesse caso, as ferramentas possuem vários dentes, o que não ocorre no torneamento, onde as pastilhas possuem apenas uma ponta trabalhando efetivamente.

Avanço por dente é o quanto a peça se deslocou por dente da ferramenta, ou seja, é a distância entre duas superfícies em usinagem consecutivas [7], como pode ser visto na Figura 6. Pode ser calculada por meio da razão entre o avanço e o número de dentes, como mostra a Equação (4):

$$F_z = \frac{f}{z}, \quad (4)$$

onde, F_z é o avanço por dente, em mm/volta/dente e z é o número de dentes da ferramenta.

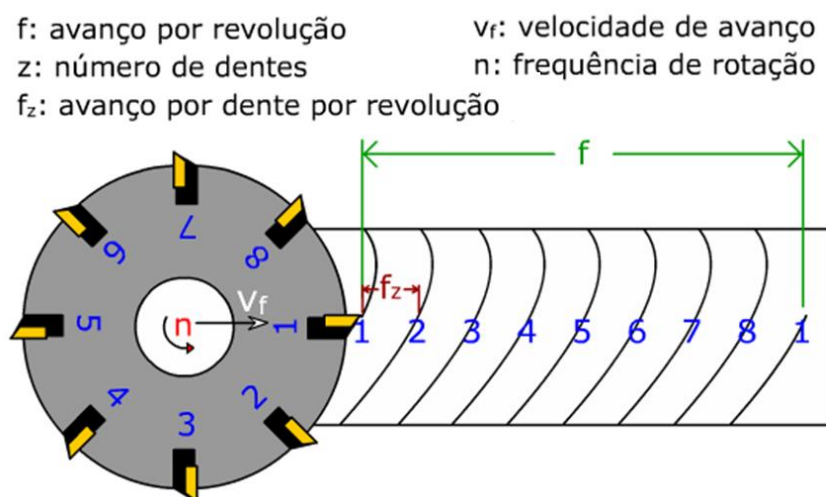


Figura 6 - Avanço por dente [11]

Assim como os outros parâmetros, os fabricantes também fornecem tabelas com valores recomendados de avanço por dente, como na Tabela 4.

Tabela 4 - Avanço por dente recomendado pelo fabricante CoroMill [12]

Diâmetro da ferramenta	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
Avanço por dente (mm/rot/dente)	0,030	0,040	0,045	0,035	0,033	0,055	0,070

2.2.5. Profundidade de corte

Esse parâmetro é o terceiro mais importante na usinagem, uma vez que está diretamente relacionado com o desgaste da ferramenta, o tempo gasto e a qualidade do cavaco. É definido como a

profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente em relação ao plano de trabalho [6]. Esse é um parâmetro que está inversamente relacionado à vida útil da ferramenta, uma vez que quanto maior a profundidade de corte, menor será a vida da ferramenta e mais quebradiço será o cavaco. Porém, não se deve diminuir muito esse parâmetro, pois, assim como o avanço, quanto menor o valor escolhido, maior será o tempo de fabricação da peça. Geralmente, escolhe-se uma profundidade de corte entre 0,4 e 0,8 mm no diâmetro de peças em torneamento e 0,5 a 2 mm em fresamento, como recomendado pelos fabricantes (Tabela 5 e Tabela 6).

Tabela 5 - Profundidade de corte para torneamento recomendada pelo fabricante Sandivik [13]

Pastilhas T-MAX P negativas com formato básico			
Pastilha	Profundidade de corte (mm)		
	Recomendado	Mínimo	Máximo
WNMG080408-PM	2,50	0,50	4,00
WNMG080412-PM	2,50	0,80	4,00
WNMG080416-PM	3,00	1,00	4,00
CNMG120408-MM	3,00	0,50	5,70
CNMG120412-MM	3,00	0,50	5,70
CNMG120416-MM	3,00	0,50	5,70
CNMG160608-MM	4,00	0,50	7,20
CNMG160612-MM	4,00	0,50	7,20
CNMG160616-MM	4,00	0,50	7,20
CNMG190608-MM	4,00	0,50	8,50
CNMG190612-MM	4,00	0,50	8,50
CNMG190616-MM	2,00	0,50	8,50
DNMG110408-MM	2,00	0,50	4,40
DNMG110412-MM	3,00	0,50	4,40
DNMG110416-MM	3,00	0,50	6,40
DNMG150408-MM	3,00	0,50	6,40
DNMG150412-MM	3,00	0,50	6,40
DNMG150608-MM	3,00	0,50	6,40
SNMG120408-MM	3,00	0,50	6,40
SNMG120412-MM	3,00	0,50	6,40

Tabela 6 - Profundidade de corte para fresamento recomendada pelo fabricante CoroMill [13]

Diâmetro da ferramenta	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	8,00
Profundidade de corte (mm)	0,40	0,50	0,70	1,00	1,30	1,50	2,00

2.3. PARÂMETROS METROLÓGICOS IMPORTANTES

Os principais parâmetros que devem ser levados em consideração para se fazer a conferência metrológica dos corpos de prova são as dimensões dos comprimentos e diâmetros, acabamento superficial e excentricidade.

2.3.1. Dimensões

As dimensões dos comprimentos e dos diâmetros dos CP's devem estar dentro das tolerâncias determinadas nos projetos desses. Essas tolerâncias são mais apertadas na região útil do corpo de prova, ou seja, na região que será efetivamente ensaiada, de modo que se reduza o erro experimental e maiores nas partes de fixação na máquina, para que o tempo de fabricação e, conseqüentemente, os custos, sejam menores (Figura 7).

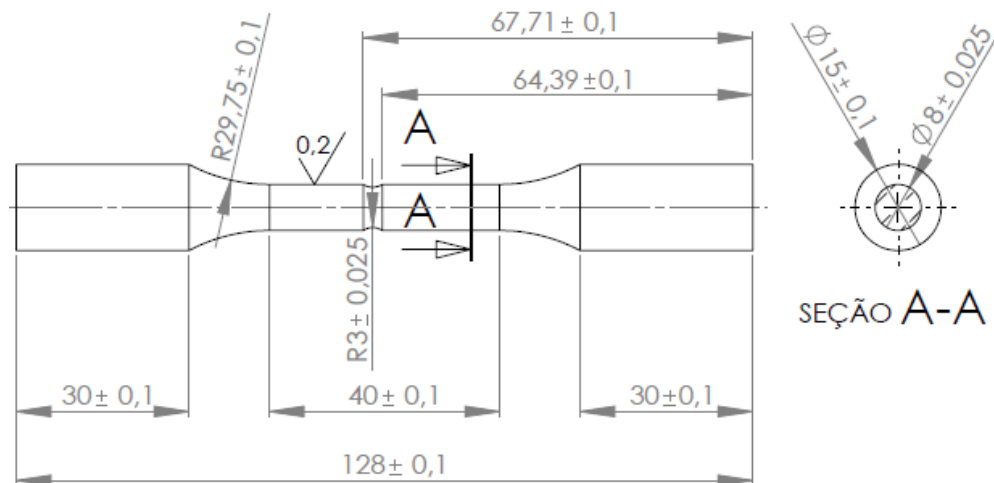


Figura 7 - Tolerâncias em um corpo de prova entalhado

A conferência metrológica desses itens pode ser feita utilizando um paquímetro pra medir os comprimentos, um micrômetro para a medida dos diâmetros (Figura 8) e um cálibre de raio para a análise do raio de transição, no caso dos CP's de seção transversal circular. É importante nos atentarmos ao fato de que o último instrumento citado não nos dá uma informação quantitativa precisa, uma vez que a medição é feita através da comparação entre o raio que se deseja medir e os existentes no pente. Isso não é um grande empecilho ao projeto, pois com ele, conseguimos mensurar com uma precisão suficiente, de modo que não apareça um concentrador de tensões no local capaz de atrapalhar o ensaio. Porém, para uma maior confiabilidade dos resultados, será utilizado um microscópio confocal que será melhor descrito adiante.



Figura 8 - a) Medição do comprimento da região da garra com um paquímetro e; b) Medição do diâmetro da seção útil do CP

Depois de feito um conjunto de medidas, deve-se calcular o desvio padrão e a média de cada dimensão, de modo que possa ser feita uma análise se a mesma está dentro da tolerância determinada.

Pelas características e confiabilidade das máquinas CNC, como já citado, não é necessário que seja feita mais que uma medida dos comprimentos e dos raios de transição, uma vez que inseridos corretamente no programa, o torno ou o centro de usinagem vão executá-los com perfeição, apresentando erros da ordem de 1 μm , como já citado anteriormente. Assim, deve ser feita uma análise apenas do diâmetro da seção útil do CP, já que as diferenças nas medidas dessa seção serão as mesmas apresentadas na região das garras.

2.3.2. Acabamento superficial

Um acabamento superficial de boa qualidade é de suma importância para a confiabilidade dos ensaios, principalmente os de fadiga. Para isso, é necessário que tenhamos uma baixa rugosidade, evitando a presença de concentradores de tensões.

De acordo com a norma ASTM E606 [14], para ensaios de fadiga, que são os que exigem um melhor acabamento superficial, os CP's devem ter uma rugosidade menor que 0,2 μm ($R_a < 0,2$), ou seja, ao longo da superfície da peça, não pode haver um vale com profundidade ou uma crista com altura maior que esta, em relação à dimensão do corpo. Em geral, após a usinagem, o corpo de prova possui uma rugosidade bem acima dessa, portanto, é recomendável que seja feito um polimento após o término da confecção com uma lixa folha d'água grana 400 ou maior.

Até recentemente, a simbologia utilizada para o acabamento eram triângulos virados de cabeça para baixo. Era uma análise qualitativa e imprecisa, uma vez que não se tinha um número específico, apenas uma convenção de que quanto mais triângulos, melhor deveria ser o acabamento. A fim de se resolver esse problema, foi criada a norma ABNT NBR 8404 [15], a qual define uma nova simbologia para os tipos de acabamento. Nesse caso, utilizaremos o símbolo mostrado na Figura 9.

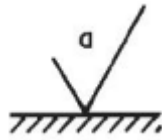


Figura 9 - Símbolo de acabamento [15]

O valor de rugosidade pretendido deve ser inserido no local que está a letra “a” na Figura 9 e as duas linhas inclinadas formando um ângulo de 60° quer dizer que o formato final da peça pode ser obtido utilizando-se qualquer processo de fabricação.

Para se aferir a rugosidade dos CP’s, foi encontrada uma grande dificuldade, uma vez que os rugosímetro utilizado no laboratório de metrologia, do prédio SG-9 da UnB (modelo SJ-210 Mitutoyo 178-561-02^a), não consegue fazer o mergulho entre a região da garra e a parte útil do corpo de prova, que é a região de interesse da medida, mesmo com o auxílio de uma base magnética e uma pedra de ajuste como pode ser visto na Figura 10.

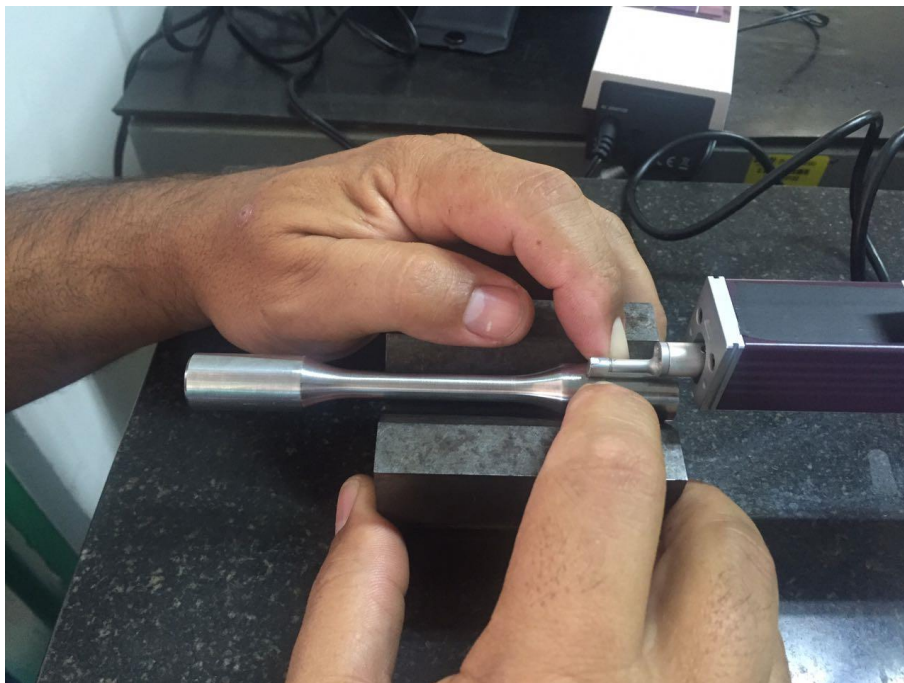


Figura 10 - Rugosímetro fazendo a leitura na região da garra

Para superar esse obstáculo, havia duas opções: medir a rugosidade na região das garras mesmo ou buscar um equipamento mais sofisticado. A grande desvantagem da primeira é o fato de que o acabamento superficial do CP, na maioria das vezes, apresenta uma relativa diferença entre a região das garras e a seção útil. Portanto, decidiu-se partir para segunda. Foi utilizado um microscópio confocal de medição à laser Olympus OLS 4100 equipado com lentes com capacidade de magnificação de até 100X (Figura 11 e Figura 12).



Figura 11 - Microscópio confocal de medição à laser Olympus OLS 4100

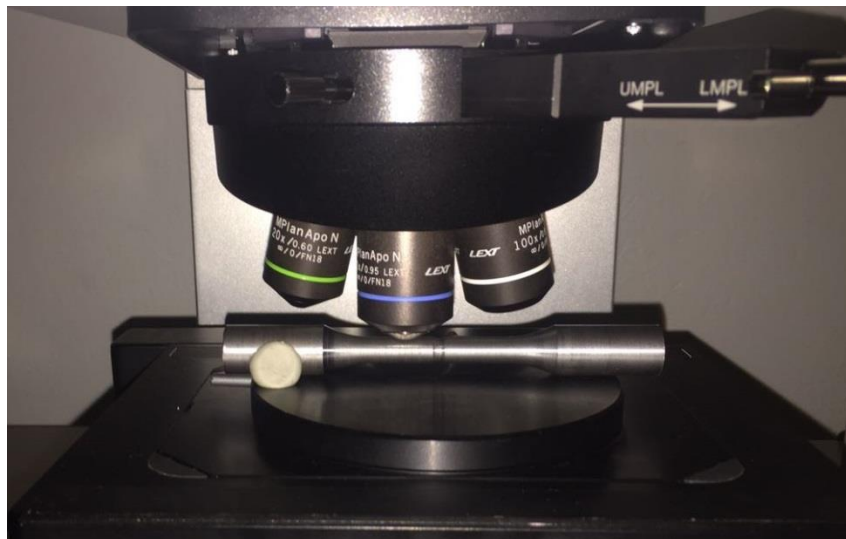


Figura 12 - Microscópio realizando a medida de rugosidade de um CP entalhado

Para medir a rugosidade e as dimensões desejadas, o microscópio usa uma metodologia baseada na montagem de uma sequência de fotos registradas, de modo que consegue mapear toda a superfície que se deseja fazer a medição (Figura 13). A partir disso, é possível traçar o perfil de rugosidade da peça (Figura 14) e fazer o cálculo.

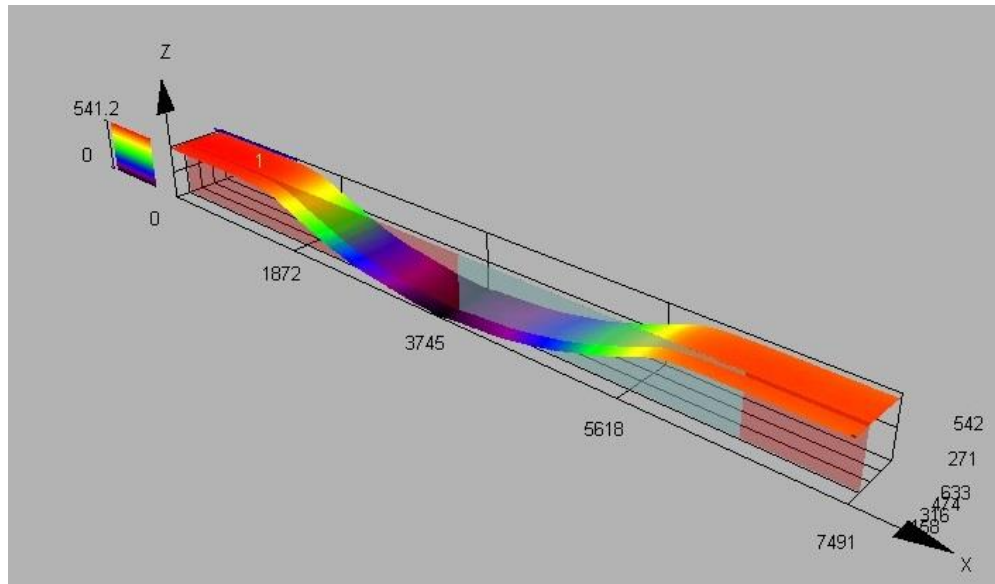


Figura 13 - Mapeamento da superfície de um CP com entalhe de 5 mm

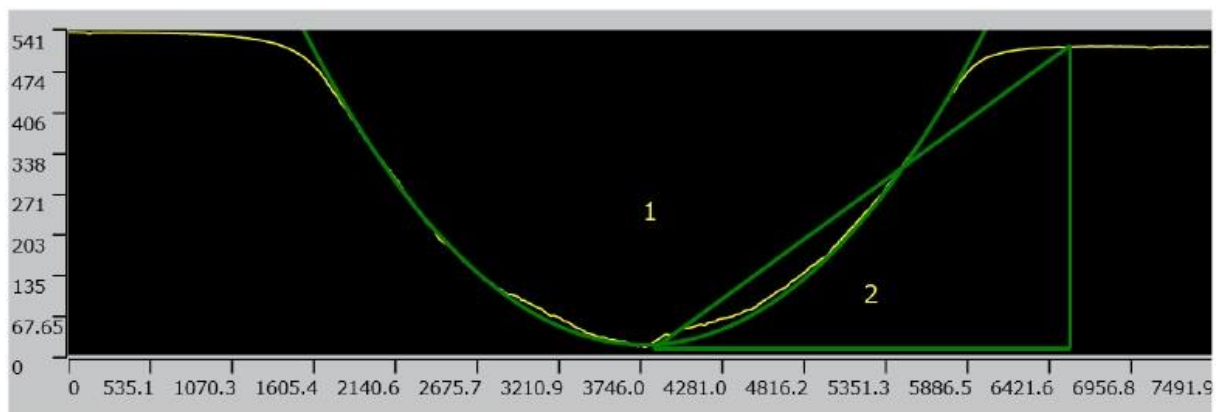


Figura 14 - Perfil gerado para a medida da rugosidade no entalhe

2.3.3. Excentricidade

Devido às características da máquina utilizada na fabricação dos corpos de prova, a medida da excentricidade é importante apenas no cilíndrico vazado, para medir a concentricidade do diâmetro do furo em relação ao diâmetro externo (Figura 15). Nos outros corpos de prova cilíndricos, essa medida não é relevante, uma vez que fabricados em tornos confiáveis, a forma final sempre será um círculo. De acordo com a norma ASTM E2207 [16], a excentricidade deve seguir a equação (5).

$$e = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{max} + d_{min}} \leq 0,0150d_{max} \quad (5)$$

Com uma excentricidade dentro dos padrões determinados por norma, haverá uma garantia que a parede de todo o CP possui uma mesma medida, certificando confiabilidade do ensaio.



Figura 15 - Foto da seção transversal de um CP cilíndrico vazado excêntrico

2.4. TIPOS DE CORPOS DE PROVA E APLICAÇÕES

2.4.1. Corpo de Prova Cilíndrico Liso de Seção Cheia

Este tipo de CP é o mais comum existente, tanto pela facilidade na sua fabricação, quanto pela quantidade de resultados que são possíveis de serem obtidos com ele. Ele é usado em máquinas para ensaio de tração uniaxial, principalmente, onde o resultado mais importante obtido é a curva de encruamento do material. Com esse CP, também é possível mensurar a tensão de escoamento, de ruptura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, entre outros.

O CP foi projetado de forma que as dimensões seguissem a norma NBR ISO 6892-1 [17] e ele se adequasse da melhor forma possível a máquina que será utilizada. As dimensões do CP projetado estão indicadas na Figura 16 e o desenho técnico se encontra no anexo.

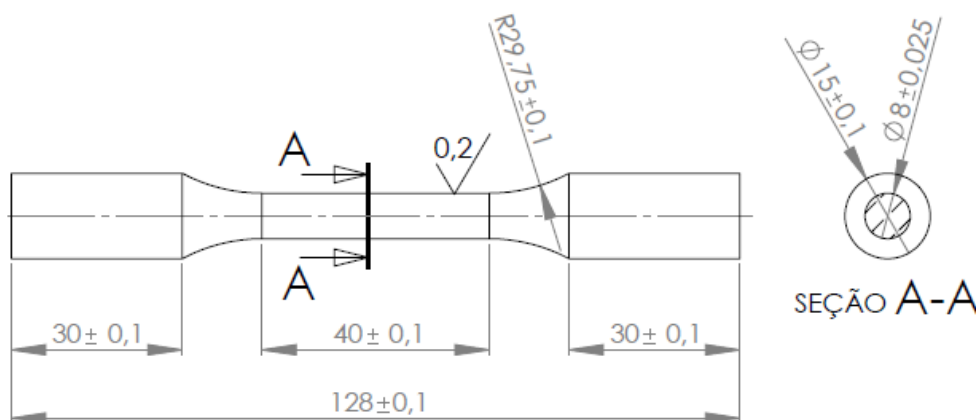


Figura 16 - Dimensões do CP cilíndrico liso

2.4.2. Corpo de Prova Cilíndrico Entalhado

Esse tipo de corpo de prova também é confeccionado para ensaio de tração uniaxial, assim como o anterior. Porém, a finalidade destes não é mais obter as propriedades do material em si, e sim determinar o efeito causado na tensão de escoamento e deformação da fratura pelos diferentes níveis de triaxialidade (η). Este é definido como sendo a razão entre a tensão hidrostática e a tensão equivalente de von Mises, ou seja, é um efeito que mede o quão a parte hidrostática do tensor de tensões é responsável pelo escoamento do material. A razão de triaxialidade pode ser calculada a partir da geometria da peça, quando as suas dimensões são conhecidas, através da equação (6):

$$\eta = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{A}{2R}\right) \quad [18] \quad (6)$$

onde, A é metade do diâmetro do corpo de prova na região do entalhe e R é o raio deste.

Portanto, para traçar o gráfico nível de triaxialidade *versus* deformação na fratura ou tensão de escoamento são necessários três pontos para que seja feito um ajuste da curva e uma extrapolação para valores de alta triaxialidade ($\eta > 1$). Assim, foram projetados três corpos de prova com diferentes raios de entalhe: 3 mm ($\eta = 0,79$), 5 mm ($\eta = 0,63$) e 14 mm ($\eta = 0,45$) e seguindo a mesma norma e o padrão definido para as tolerâncias do CP liso. As dimensões desses estão indicadas nas Figura 17, Figura 18 e Figura 19 e seus respectivos desenhos técnicos estão no anexo.

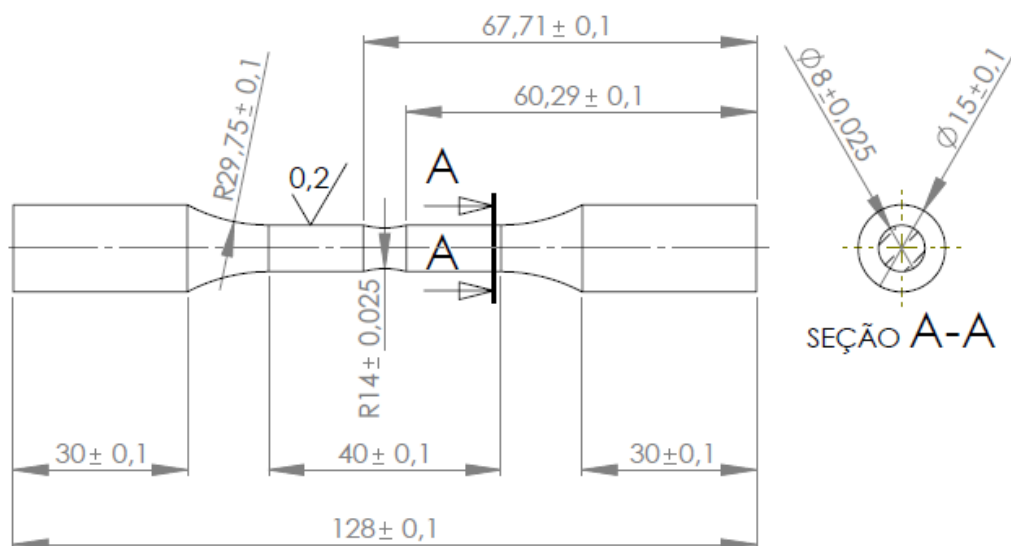


Figura 17 - Dimensões do CP entalhado com raio de 14 mm

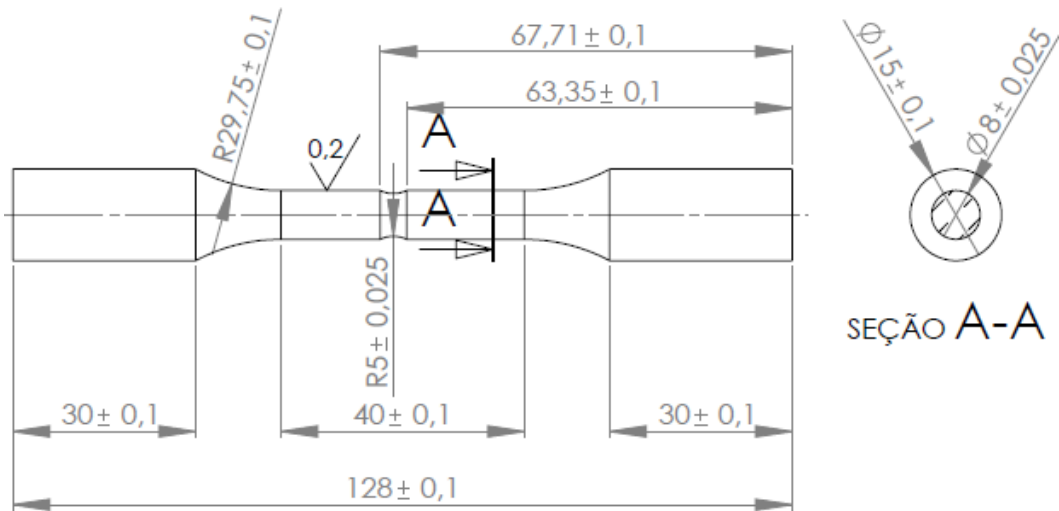


Figura 18 - Dimensões do CP entalhado com raio de 5 mm

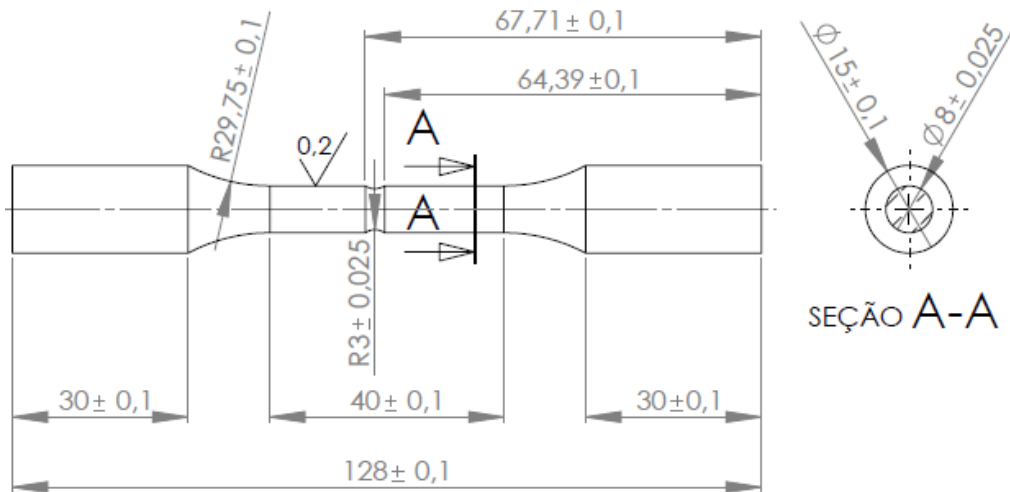


Figura 19 - Dimensões do CP entalhado com raio de 3 mm

2.4.3. Corpo de Prova Cilíndrico Vazado

Como dito anteriormente, com os CP's entalhados, conseguimos determinar a curva nível de triaxialidade *versus* deformação na fratura com boa precisão para valores $\eta > \frac{1}{3}$. Porém para $\eta < \frac{1}{3}$, a curva não se comporta da mesma maneira. Portanto, se fez necessário a obtenção de mais um ponto nessa região. Em um estado de carregamento de cisalhamento puro, o tensor tensão de Cauchy pode ser escrito como:

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0 & \tau & 0 \\ \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

onde τ é a tensão de cisalhamento que está sendo aplicada.

Podemos observar que, nesse caso $tr(\sigma) = 0$, portanto, temos que a tensão hidrostática também é igual a 0. Desta forma, de acordo com a definição de razão de triaxialidade, temos que $\eta = 0$. Logo, com um ensaio de torção pura, é possível determinar mais um ponto da curva desejada.

Segundo a literatura, existem apenas dois CP's cilíndricos que são capazes de realizar esse ensaio: o cilíndrico liso, já citado, e o tubular de parede fina (vazado). O primeiro apresenta uma grande desvantagem em relação ao segundo devido ao fato de que a tensão cisalhante cresce com a distância entre o ponto que está sendo calculada e o centro da barra. Assim, em um corpo de prova de seção cheia, o gradiente de tensão entre o centro e as bordas é muito grande (Figura 20 – a)) [15]. Para o CP tubular de parede fina, pode-se considerar que a tensão cisalhante atuando nele é uniforme (Figura 20 – b)), com um erro associado muito pequeno, o que acarreta grandes vantagens no cálculo das tensões atuantes.

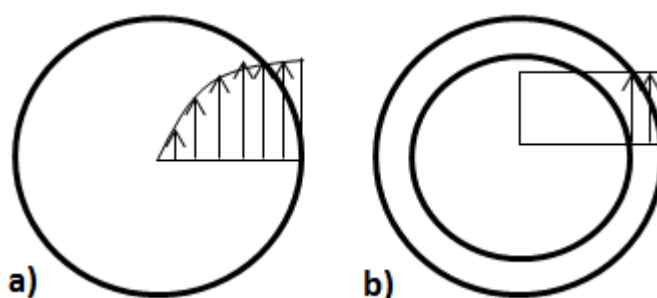


Figura 20 - Gradiente de tensão: a) CP cilíndrico liso de seção cheia; b) CP cilíndrico vazado

Desta forma, um CP vazado foi projetado, seguindo os mesmos princípios de tolerâncias e acabamento e obedecendo à norma ASTM E2207 [16]. Suas dimensões estão indicadas na Figura 21 e seu desenho técnico está no anexo.

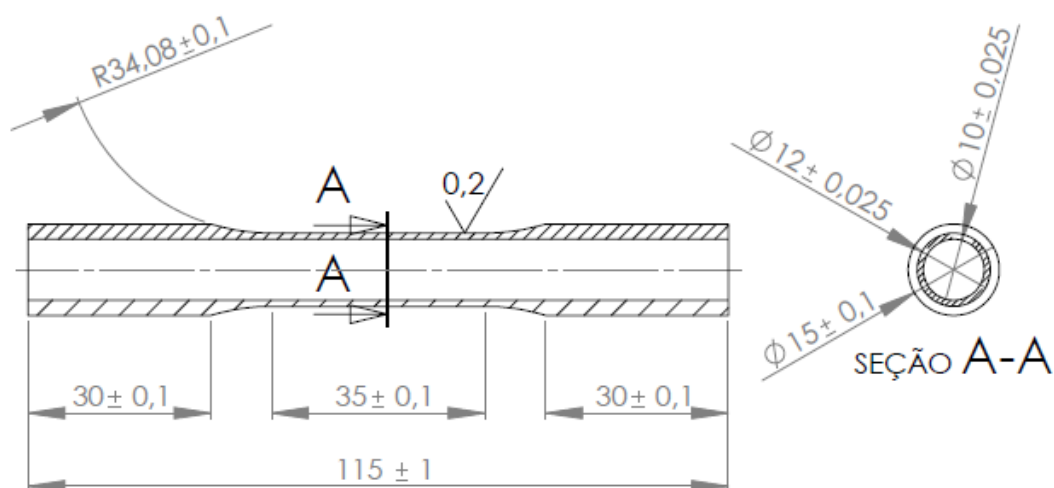


Figura 21 - Dimensões do corpo de prova vazado

2.4.4. Corpo de Prova Retangular Entalhado

Assim como o cilíndrico, esse é um corpo de prova entalhado, porém, sua seção transversal é retangular. O objetivo dos ensaios com esse tipo de CP é semelhante ao outro, mas é usado em máquinas com diferentes formas de fixação. A principal vantagem é que ele possui uma maior gama de raios no entalhe, já ele pode ser confeccionado em um centro de usinagem CNC e esses raios dependem apenas do diâmetro da fresa. O CP cilíndrico entalhado possui uma menor variedade devido à restrição no ângulos da ferramenta.

A fim de se obter a dependência entre a tensão de escoamento e o raio do entalhe, estudos prévios já foram feitos [20], nos quais foram confeccionados corpos com entalhe de 1,25 mm, 2,5 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 35 mm e 50 mm de raio, bem como um CP liso (Figura 22).

Na Figura 23 podem ser vistas as dimensões do CP com entalhe de 10 mm de raio e seu desenho técnico está em anexo.



Figura 22 – Corpos de prova retangulares entalhados [20]

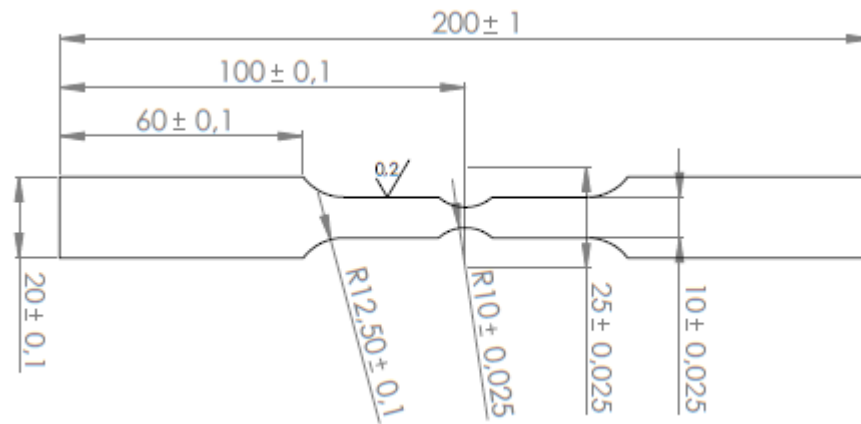


Figura 23 - Dimensões do corpo de prova retangular com entalhe de 10 mm de raio

2.4.5. Corpo de Prova de Cisalhamento em Máquina de Tração

2.4.5.1. Retangular

Analogamente ao corpo de prova cilíndrico vazado, esse também visa uma análise quanto à tensão de cisalhamento máxima que o material suporta. Porém, a diferença entre os dois, além do formato, é que o CP vazado falhará por cisalhamento em um ensaio de torção, já esse obtém o mesmo efeito em um ensaio de tração.

Este CP se caracteriza por possuir um entalhe de saída para cada um dos dois furos centrais e outro intermediário entre os dois. Em estudos prévios [20], foram utilizados entalhes no centro com profundidade de 0,2 mm e 0,5 mm para CP com espessura de 1,56 mm e de 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm e 2 mm para os que possuíam espessura de 6,35 mm.

A Figura 24 mostra uma foto onde é possível observar os diferentes entalhes nos CP's e na Figura 25 estão representadas as dimensões do corpo de prova projetado sem o entalhe central.



Figura 24 - Diferentes profundidades de entalhe [20]

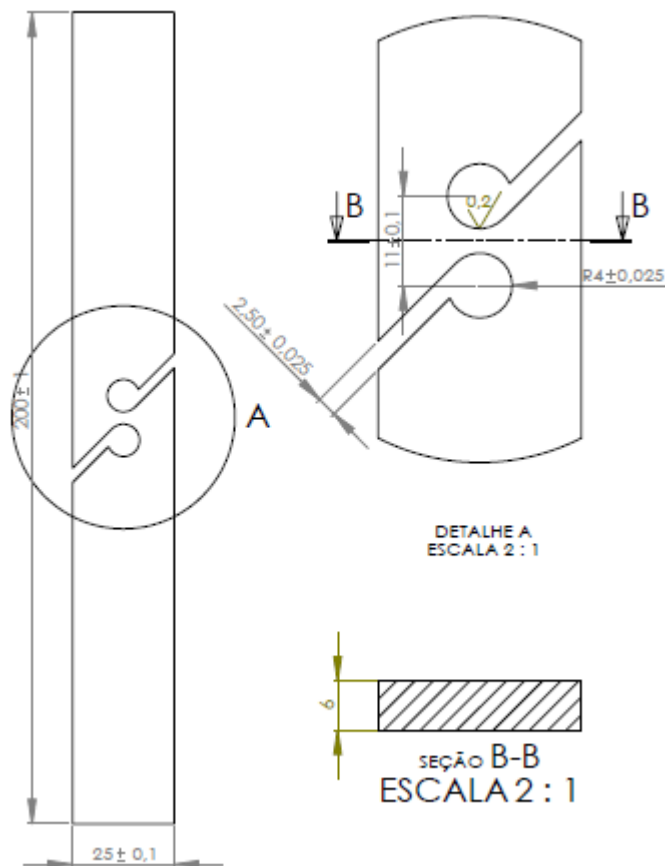


Figura 25 - Dimensões do CP para ensaio de cisalhamento em máquina de tração

2.4.5.2. Borboleta

Esse tipo de corpo de prova difere do anterior na geometria, porém a sua finalidade é semelhante, uma vez que falhará por cisalhamento em um ensaio de tração [20]. A grande desvantagem desse em relação ao anterior é a complexidade na geometria, o que dificulta a confecção e a conferência das medidas.

É importante observarmos também a qualidade dos raios de concordância que ele possui, a fim de se evitar concentradores de tensão, e o entalhe na região central, onde se espera que ocorra a falha.

A norma NBR ISSO 6892-1 [17] também determina dimensões para corpos de prova planos. Levando-se em conta também as possíveis tolerâncias alcançadas pela máquina e o custo de produção, projetou-se um CP cujas dimensões estão representadas na Figura 26.

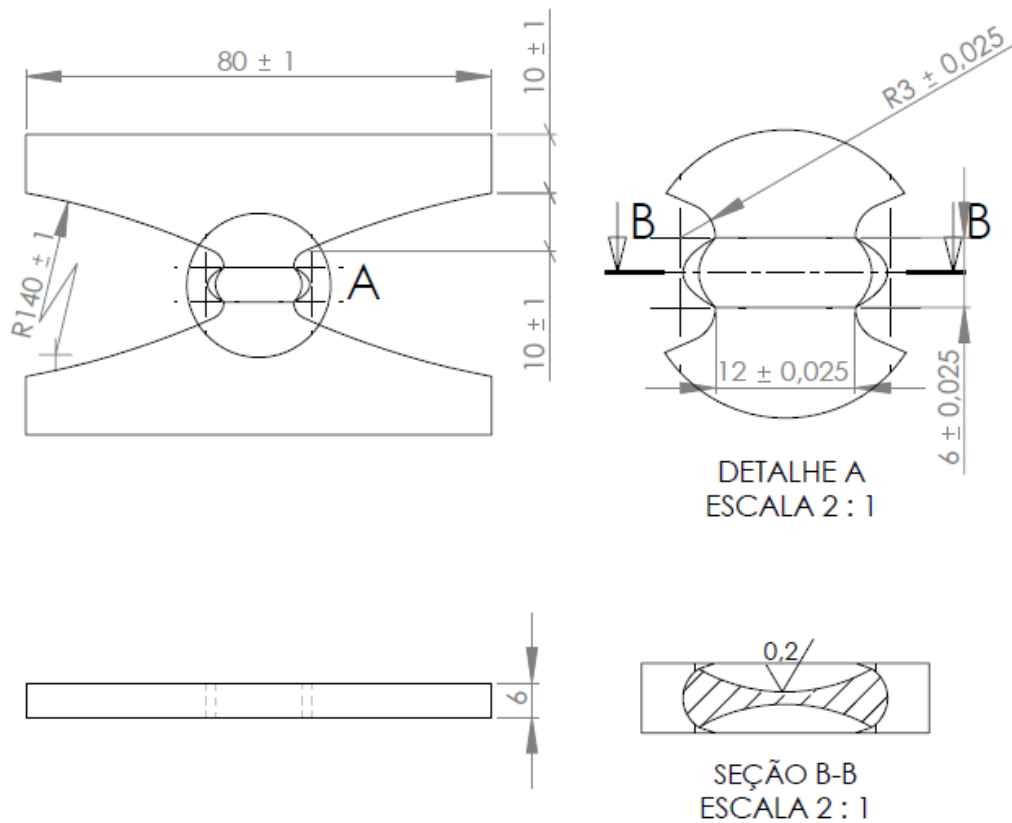


Figura 26 - Dimensões do corpo de prova borboleta

2.4.6. Corpo de Prova de Arcan Modificado

Foi proposta uma mudança no teste de Arcan [20], de modo que o mesmo CP possa ser ensaiado quanto à tração e cisalhamento, simultaneamente ou separadamente. Esses corpos de prova foram projetados apenas para a espessura de 6 mm, pois os mais finos mostraram instabilidade quando foi aplicado torção nos testes. Para esses CP's, a profundidade do entalhe é de 2 mm.

A desvantagem desse tipo de corpo de prova é que ele só pode ser ensaiado em máquinas bem específicas, as quais conseguem aplicar tração em mais de uma direção.

A Figura 27 mostra como é feita a fixação na máquina desse tipo de corpo de prova e a Figura 28 as suas dimensões.



Figura 27 - Fixação na máquina de tração [20]

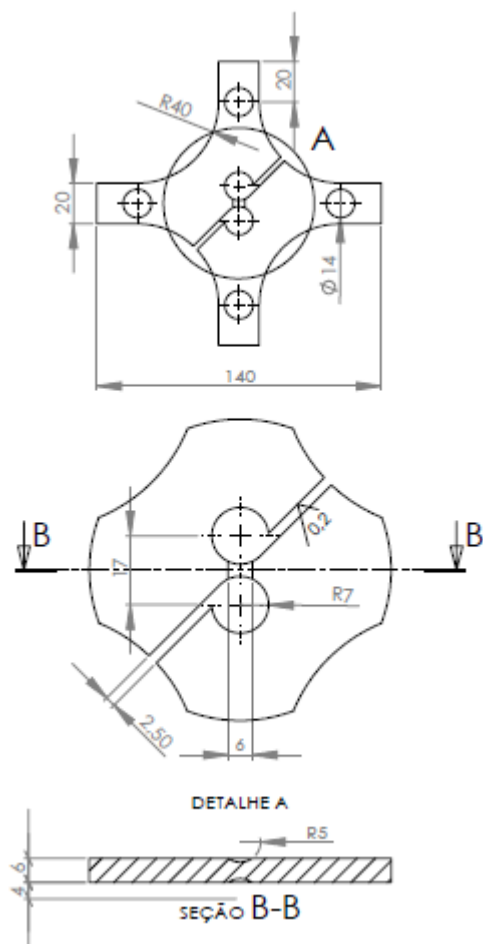


Figura 28 - Dimensões do corpo de prova de Arcan modificado

2.4.7. Corpo de Prova de Falha Dupla

Esse é o tipo de CP mais complexo entre todos apresentados. Isso porque ele possui 4 furos e 5 entalhes. Possui três regiões críticas quando é tracionado. Já os pequenos entalhes nos planos frontal e anterior são confeccionados para concentrar ainda mais as tensões, aumentando o efeito causado pelos entalhes laterais e cooperando com a falha por cisalhamento puro no central [22].

O projeto feito considera que os dois entalhes laterais possuem o mesmo raio. Porém, é possível que se tenha raios diferentes o que causaria uma não simetria no CP e uma diferente sequência de fratura, o que pode ser conveniente para algumas análises.

A Figura 29 mostra sequência de fraturas obtidas em um ensaio de tração desse corpo de prova e a Figura 30 as suas dimensões e seu desenho técnico está em anexo.

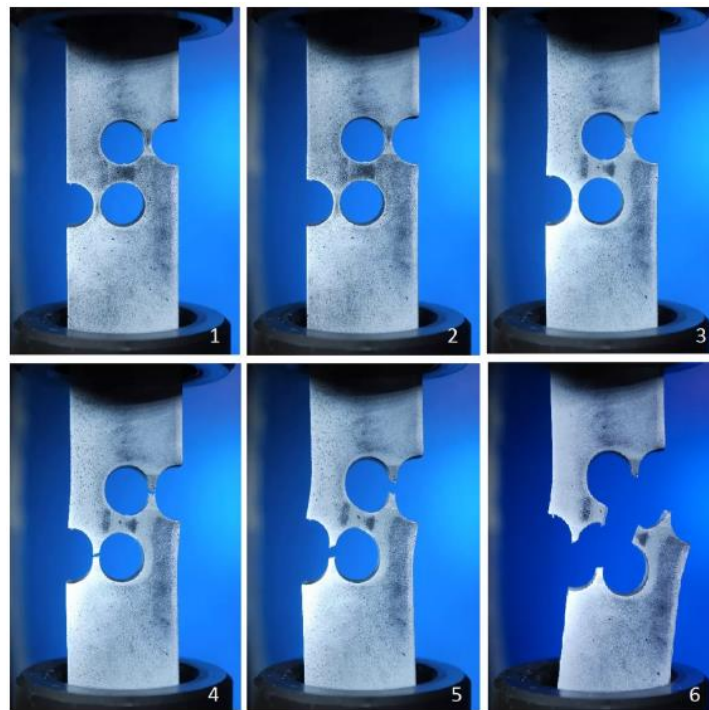


Figura 29 - Sequência de fraturas [22]

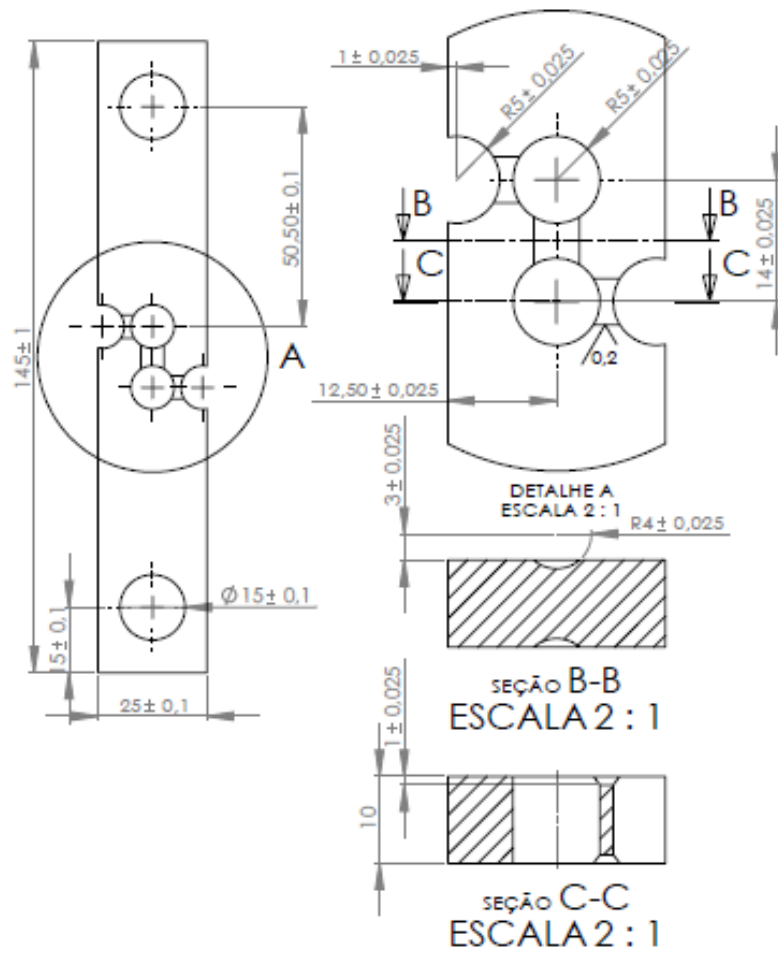


Figura 30 - Dimensões do CP de falha dupla com entalhes de 1 mm de profundidade

3. PROJETO E MODELAGEM DE CORPOS DE PROVA EM AMBIENTE CAM

Para essa etapa, decidiu-se restringir o projeto a apenas 3 corpos de prova, devido ao curto espaço de tempo, à complexidade da confecção e aos gastos com ferramentas e materiais. Desta forma, serão apresentados os projetos e as modelagens de dois tipos de CP's cilíndricos (entalhado e vazado) e um de seção transversal retangular (cisalhamento em máquina de tração).

3.1. GEOMETRIA E MATERIAIS DOS CP'S

A geometria dos corpos de prova cilíndricos para a confecção não são complexas. O tarugo inicial deve ter um diâmetro maior que 15 mm (diâmetro da região da garra do CP) e um comprimento entre 135 e 140 mm para os entalhados e aproximadamente 125 mm para os vazados, de modo que se tenha uma região excedente para fixação no torno CNC, sem que haja desperdício de muito material. Ambos os CP's foram modelados no *software* Mastercam X9 e a forma de fixação deles pode ser vista na Figura 31, onde, à esquerda, tem-se as castanhas utilizadas, no centro, o tarugo bruto antes da usinagem e à direita, o contra-ponta e o incerto de corte.

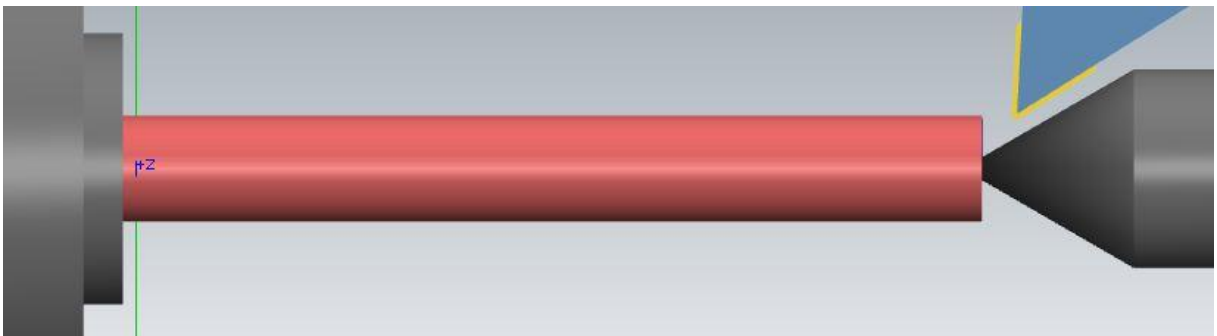


Figura 31 - Forma de fixação dos CP's cilíndricos

Para o corpo de prova de cisalhamento em máquina de tração de seção transversal retangular, a geometria da chapa bruta é simples também. É necessário que essa possua uma espessura igual à dimensão final do CP e um comprimento de aproximadamente 50 mm a mais para ser feita a fixação na máquina através de pinças. Porém, sua geometria final após a usinagem será ligeiramente mais complexa do que os cilíndricos, como pode ser visto na modelagem feita no *software* Mastercam X9 (Figura 32). No projeto desse corpo de prova, deve-se pensar bem na forma de fixação da peça na máquina, para evitar uma possível quebra da ferramenta. Portanto, nesse caso, serão utilizadas duas conexões de 5 mm de espessura, uma em cada extremidade do CP e a fixação será feita através de parafusos e porcas em conjunto com dois calços para se garantir o paralelismo entre a chapa e o barramento.

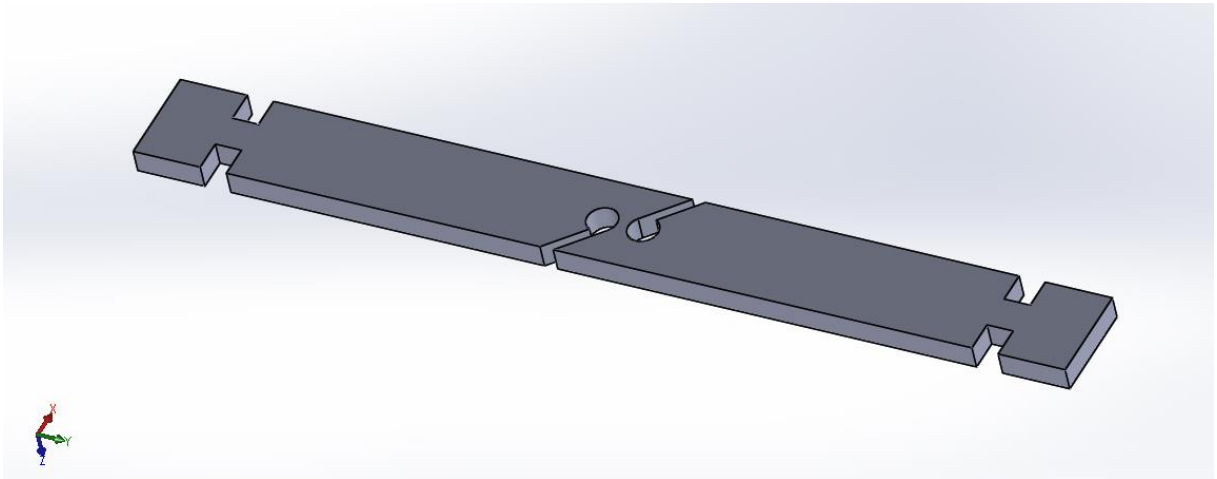


Figura 32 - Modelagem do corpo de prova de cisalhamento em máquina de tração

Para a confecção dos corpos de prova cilíndricos entalhados e dos retangulares de cisalhamento em máquina de tração foi utilizado um aço SAE 4340 com dois diferentes tratamentos térmicos: recozido e normalizado. Esses apresentam uma dureza média de 220 HB e 300 HB, um tensão de escoamento da ordem de 500 MPa e 700 MPa, respectivamente [23]. A composição química desse material, segundo o fabricante pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do aço SAE 4340

C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Mo (%)	Cu (%)	Al (%)
0,420	0,760	1,710	0,670	0,200	0,012	0,010	0,230	0,060	0,000

Já para os vazados, utilizou-se um aço inox 304L normalizado, com uma dureza média de 260 HB e uma tensão de escoamento da ordem de 500 MPa [24]. Sua composição química está mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química do aço inox 304L [24]

C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Mo (%)	Cu (%)	N (%)
0,018	18,160	8,300	1,340	0,430	0,034	0,028	0,220	0,250	0,081

Nota-se que essa diferença na composição química dos materiais, principalmente no teor de carbono, provoca alterações na usinabilidade dos mesmos. Na prática, observa-se que o aço inox apresenta um acabamento espelhado para uma gama de combinações dos parâmetros de corte. Já para o aço SAE 4340, esse tipo de acabamento não foi alcançado.

3.2. DEFINIÇÃO DE FERRAMENTA E PARÂMETROS DE USINAGEM

Para a confecção dos CP's cilíndricos, tanto o entalhado como o vazado, utilizarão a mesma ferramenta para o desbaste e o acabamento, devido aos mergulhos que serão realizados, caso seja utilizada um incerto mais apropriado para o desbaste, haveria um choque entra a peça e o suporte. Será utilizada uma pastilha da fabricante *Sandvik* do modelo CNMG 120408-MM, recomendada para usinagem de aços com dureza de 150 HB à 350 HB [10], de tal forma que seja possível a usinagem do aço 4340 recozido e normalizado e do inox 304L. Para o desbaste, optou-se por uma velocidade de rotação menor, para diminuir o desgaste da ferramenta e um avanço maior, uma vez que, nessa etapa, o acabamento não é relevante, de modo que o tempo de fabricação seja reduzido. Dessa forma, utilizando o catálogo fornecido pelo fabricante, definiu-se inicialmente um avanço de 0,15 mm/rot para o desbaste [10] e uma rotação de 1500 rpm (Figura 33), de modo que obtém-se, segundo a Equação (1), uma velocidade de corte de aproximadamente 100 m/min para o diâmetro maior e 40 m/min para o menor, dentro do intervalo recomendado para aços de alta liga [8]. Esses valores podem ser alterados após a usinagem, na tentativa de obtenção de um menor desgaste da ferramenta e uma redução do tempo gasto.

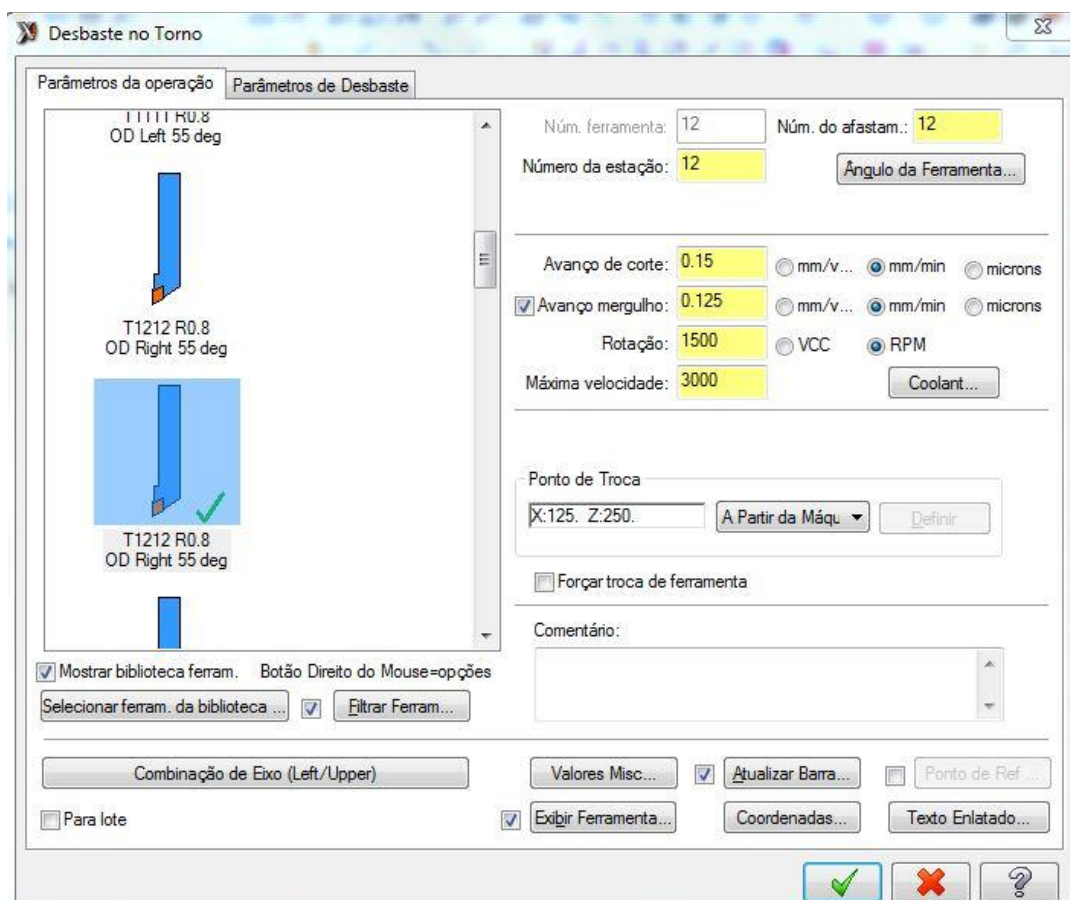


Figura 33 - Parâmetros de corte para o desbaste de CP's cilíndricos

Para o acabamento, optou-se por aumentar a rotação e diminuir o avanço, a fim de se obter uma menor rugosidade. Assim, definiu-se um avanço de 0,08 mm/rot e uma rotação de 2500 rpm (Figura 34), de modo que se obtém uma velocidade de corte de aproximadamente 120 m/min no diâmetro maior e 65 m/min no menor, permanecendo dentro do intervalo definido pelo fabricante para aços de alta liga [10]. Assim como no desbaste, esses valores podem ser alterados com o objetivo de se obter um melhor acabamento superficial da peça.

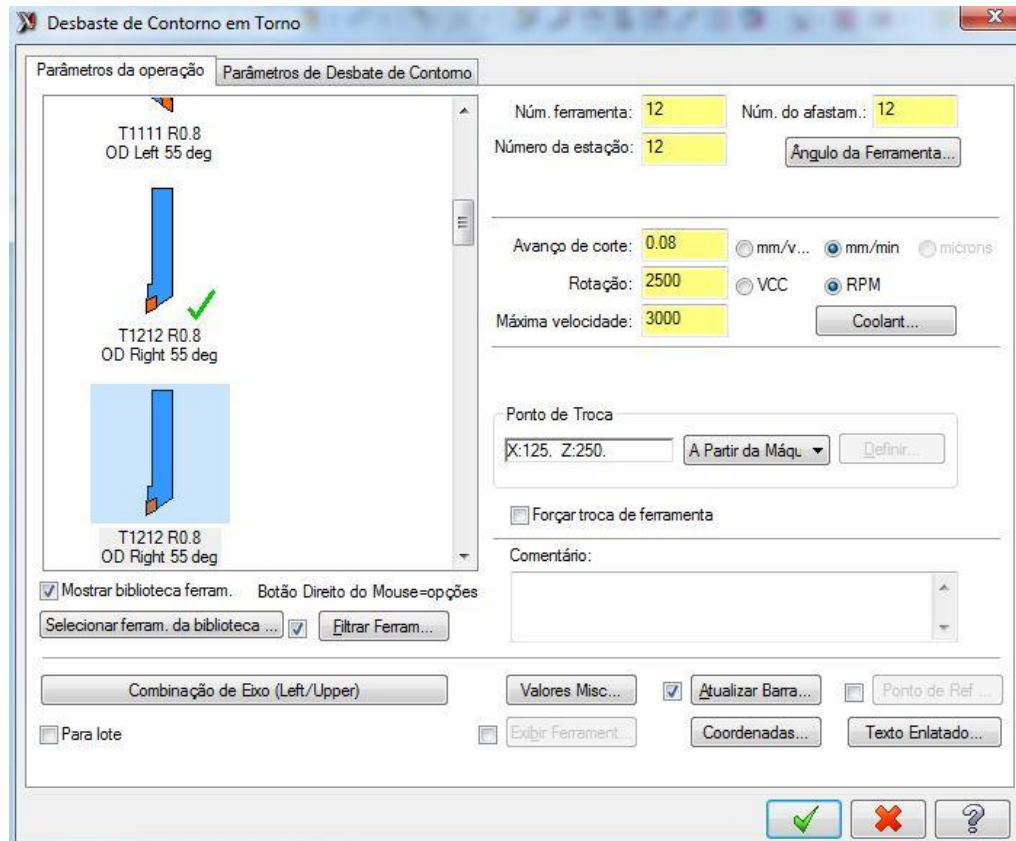


Figura 34 - Parâmetros de corte para o acabamento de CP's cilíndricos

Na confecção do CP retangular de cisalhamento em máquina de tração, será usada uma fresa de topo reta de 2 mm de diâmetro para a realização dos furos e entalhes no centro e uma de 6 mm para a usinagem do contorno. Para gerar o código e não haver erro na definição do zero peça, deve-se criar as ferramentas no programa com os tamanhos específicos das que serão usadas (Figura 35 e Figura 36).

Para a usinagem com a ferramenta de menor diâmetro, por ser mais delicada e ser uma região onde deseja-se um melhor acabamento, optou-se por um avanço por dente e uma profundidade de corte que fossem os menores possíveis determinados pelo fabricante e uma velocidade de rotação próxima ao máximo da máquina, para se evitar a quebra da ferramenta e obter uma menor rugosidade na região, independente do tempo que será gasto na usinagem, uma vez que não haverá uma produção em série. Portanto, definiu-se um avanço de 0,03 mm/dente/rot, uma rotação de 5000 rpm e uma profundidade de corte de 0,5 mm [12]. Desta forma, segundo a Equação (1), obtemos uma velocidade de corte de

aproximadamente 40 m/min, um valor um pouco abaixo do recomendado pelo fabricante [10], porém, é o máximo possível com esse diâmetro de fresa e com a máquina disponível.

O desbaste do contorno do corpo de prova é uma usinagem mais simples, uma vez que será retirado menos material, utilizará uma fresa mais robusta e o acabamento superficial não é um parâmetro tão importante quanto nos entalhes centrais. Desta forma, optou-se por um avanço mais elevado, uma profundidade de corte maior, economizando tempo, e uma rotação mais baixa, desgastando menos a ferramenta. Dentro dos parâmetros recomendados pelo fabricante [12], definiu-se um avanço de 0,05 mm/dente/rot, uma rotação de 4000 rpm e uma profundidade de corte de 1,5 mm. Assim, segundo a Equação (1), obtém-se uma velocidade de corte de aproximadamente 80 m/min, dentro do intervalo requerido [10].

Define End Mill

Adjust geometric properties used to define the tool shape.

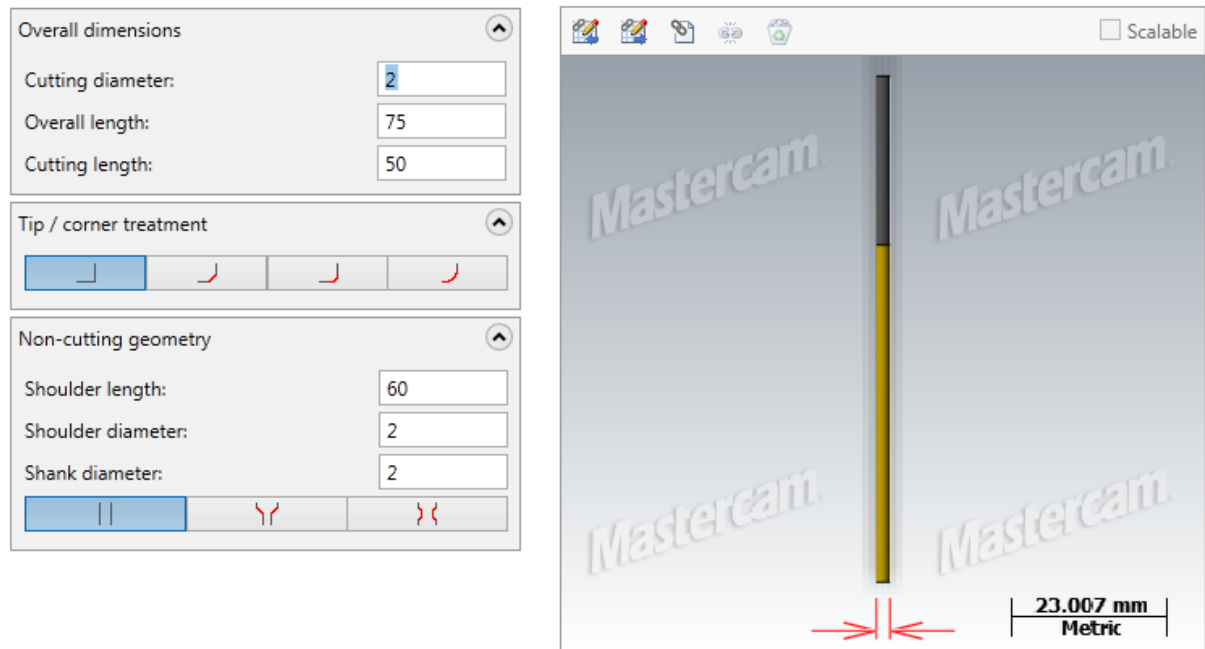


Figura 35 - Definição da fresa de topo de 2 mm

Define End Mill

Adjust geometric properties used to define the tool shape.

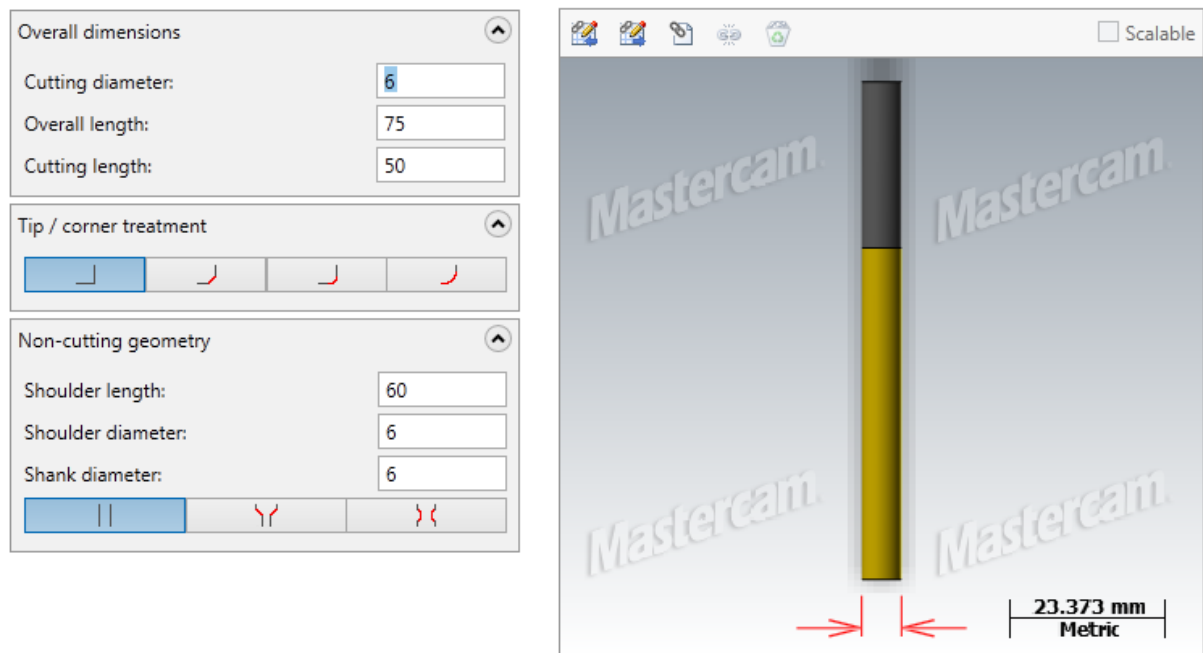


Figura 36 - Definição da fresa de topo de 6 mm

3.3. CAMINHO DE USINAGEM E CÓDIGO G

Depois de finalizada a parte geométrica dos desenhos, a definição das ferramentas e dos parâmetros de corte, o Mastercam X9 gera os caminhos que serão percorridos para a realização da usinagem. Para os CP's cilíndricos, optou-se por dar um desbaste grosseiro no tarugo de até 2 mm (caso seja necessário um desbaste maior, para o incerto utilizado, recomenda-se que se dê mais de um passe), de modo que ele fique com um diâmetro de 15 mm (diâmetro da região da garra) e em seguida dar vários passes na parte útil do CP, cada um de 0,5 mm, até chegar na dimensão final desejada. Na Figura 37 e na Figura 38 podem ser vistos os caminhos de usinagem obtida dos corpos de prova cilíndricos vazado e entalhado, respectivamente.

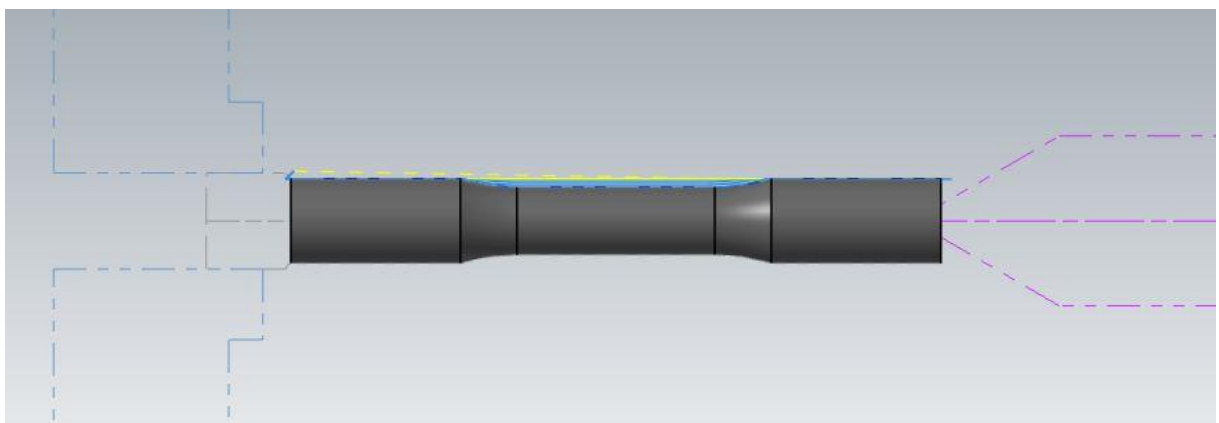


Figura 37 - Caminhos de usinagem do CP cilíndrico vazado

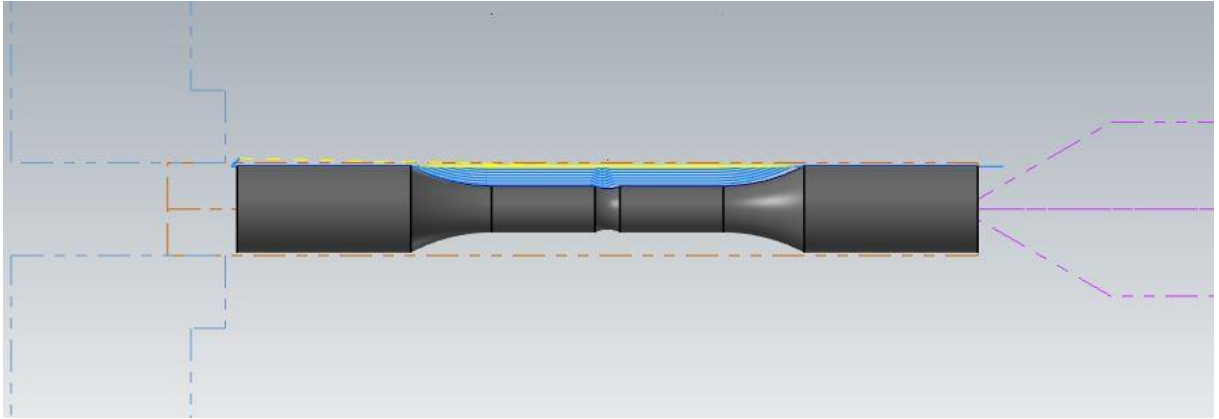


Figura 38 - Caminhos de usinagem do CP cilíndrico entalhado

Já para o CP de cisalhamento em máquina de tração, primeiramente serão usinados os furos no centro, com um passe de 0,5 mm, pelo fato de estar retirando material em todo o diâmetro da ferramenta e na sequência, os contornos, com uma profundidade de corte de 2 mm, uma vez que será retirada uma fina camada de aproximadamente 1 mm de largura. Na Figura 39 podem ser vistos os caminhos de usinagem obtidos e na Figura 40, os mesmos de forma mais detalhada.

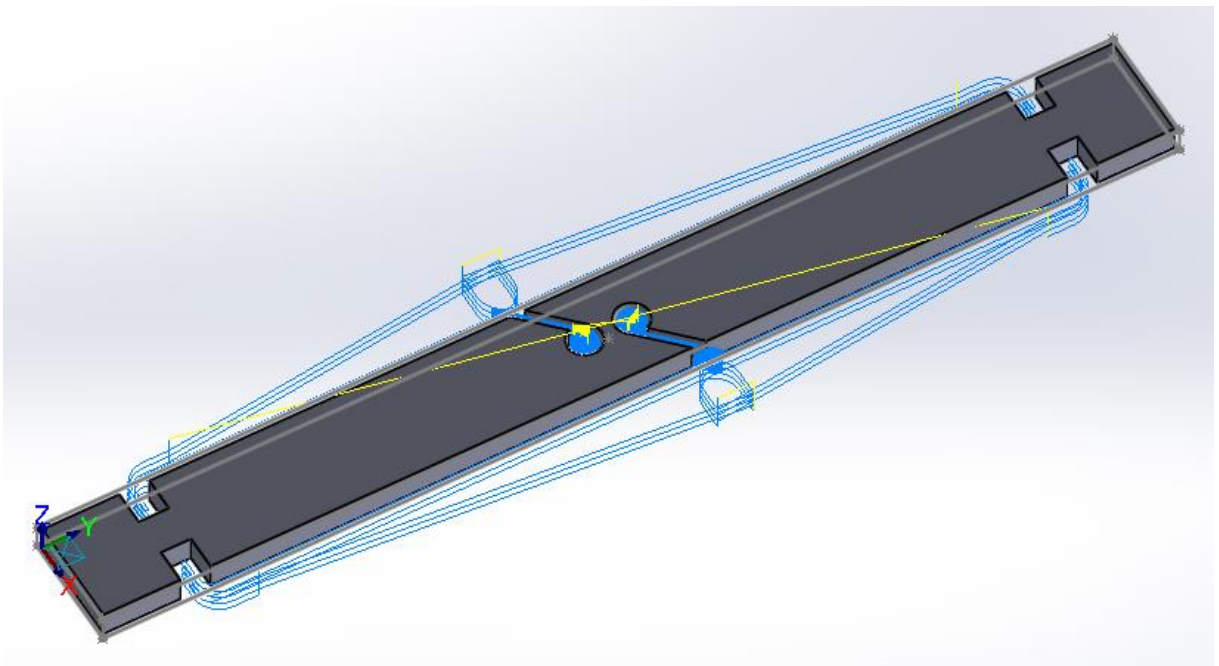


Figura 39 - Caminhos de usinagem do CP de cisalhamento em máquina de tração

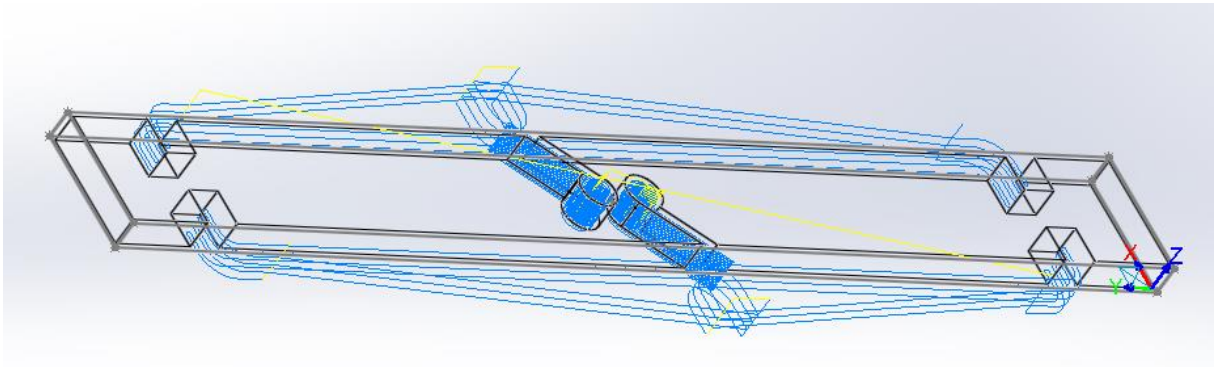


Figura 40 – Caminhos de usinagem vistos em detalhe

Além dos caminhos de usinagem e da simulação, o Mastercam X9 também gera o código G que será lido pelo CNC, em ambos os casos, em linguagem FANUC. Para isso, o arquivo deve ser salvo em um pen drive em um formato correspondente (extensão NC) e importado para a máquina. Na Figura 41, pode ser visto um trecho do código gerado para a usinagem do CP de cisalhamento em máquina de tração, onde a letra “G” significa um comando para a máquina, por exemplo, “G0” é avanço em velocidade máxima até certo ponto, “X”, “Y” e “Z” são as coordenadas cartesianas, F é o avanço.

```

288 N2880 G0 Z1.
289 N2890 X30.8 Y243.4
290 N2900 Z-3.25
291 N2910 G1 Z-7. F159.2
292 N2920 X29.9 F1697.6
293 N2930 G3 X29. Y242.5
294 N2940 G1 Y241.5
295 N2950 X37.5
296 N2960 G2 X39. Y240.
297 N2970 G1 Y132.343
298 N2980 Y20.
299 N2990 G2 X37.5 Y18.5
300 N3000 G1 X29.
301 N3010 Y16.5
302 N3020 X41.
303 N3030 Y243.5
304 N3040 X29.
305 N3050 Y242.5
306 N3060 Y241.5
307 N3070 X31.
308 N3080 G3 X31.9 Y242.4
309 N3090 G1 Y243.3
310 N3100 G0 Z1
  
```

Figura 41 - Trecho de um dos códigos gerados

4. METODOLOGIA DE CONFECÇÃO

4.1. CORPO DE PROVA ENTALHADO

Após o código G ter sido gerado, pode-se dar início à confecção do corpo de prova. A primeira etapa é o corte da barra. É necessário que o bloco inicial que será usinado tenha um diâmetro maior do que 15 mm (diâmetro da região das garras) e um comprimento de cerca de 138 mm (128 mm para ser usinado efetivamente e 10 mm para a fixação na placa), de modo que se assegure contra um possível arrancamento da peça e se evite muito desperdício de material. Recomenda-se que esse corte seja feito numa serra de fita horizontal, de maneira automatizada para se ganhar tempo e reduzir o esforço do operador (Figura 42).



Figura 42 - Corte do tarugo em serra de fita horizontal

Finalizado o corte, a etapa seguinte é o furo de centro. Esse é extremamente importante, pois é nele que será apoiado o contra ponta para a fixação da barra, de forma que ele garantirá a cilindricidade do CP. Essa furação pode ser feita no próprio torno CNC, desde que a o tarugo bruto tenha no máximo 16 mm, para que ele possa ser fixado na placa móvel. Caso possua um diâmetro maior, o furo de centro pode ser feito em uma fresadora vertical, o que não é recomendado uma vez que não se pode garantir a centralização desse, ou em um torno mecânico, o qual fará um furo perfeitamente centralizado, como será mostrado adiante.

Para fazer o furo de centro, primeiramente deve-se usinar a face da peça, de modo que ela fique plana, evitando um possível deslocamento lateral da broca na furação (Figura 43 – a). Com a face da peça perfeitamente plana, realizar a furação com uma broca de centro até uma profundidade de aproximadamente 5 mm (Figura 43 – b).

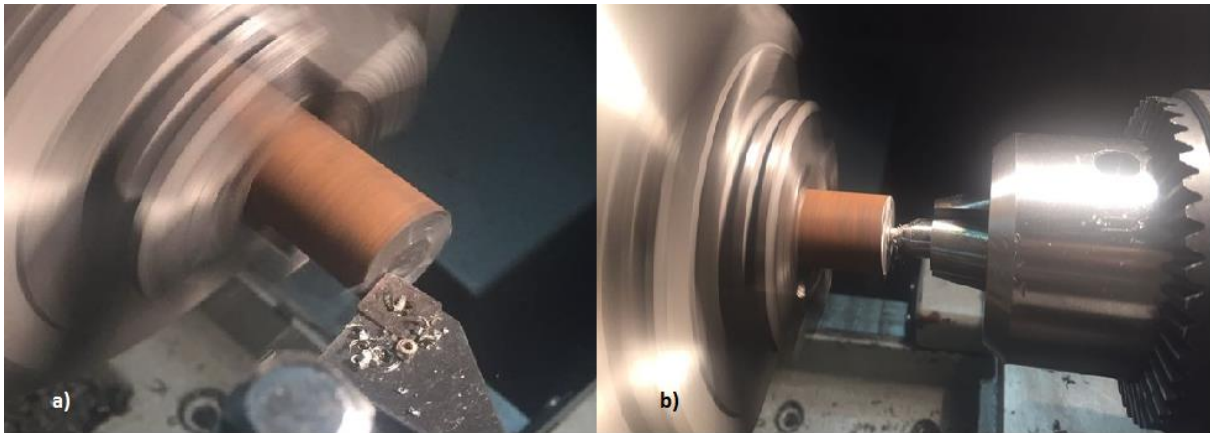


Figura 43 - a) Faceamento da peça; b) Furo de centro

Na sequência, deve-se fazer a fixação do tarugo no torno CNC. Para tal, são utilizadas castanhas ligas à placa móvel no lado esquerdo e pelo contra-ponta no lado direito, como pode ser visto na Figura 44. Deve-se ter o cuidado de medir a dimensão do tarugo fora das castanhas, para evitar um choque entre essas e a torre, o que danificaria o incerto e a placa móvel. Nesse caso, como será confeccionado um CP cilíndrico liso, o qual possui um comprimento total de 128 mm, por segurança, optou-se por deixar o tarugo com 130 mm para fora das castanhas, como visto também na Figura 44.



Figura 44 - Fixação do tarugo

A etapa seguinte é o chamado zero peça, isto é, o ato de informar ao programa do CP as coordenadas do ponto que começa a peça. Para isso, deve-se encostar manualmente a pastilha na face direita da peça (Figura 45). Feito isso, é recomendado que se suba a ferramenta algumas dezenas de milímetros, de onde possa começar o programa sem oferecer risco, com o cuidado de não deslocar a torre lateralmente. Deve-se ler a coordenada absoluta em Z na tela do computador (Figura 46) e inserir esse valor no programa.



Figura 45 - Primeiro passo do zero peça

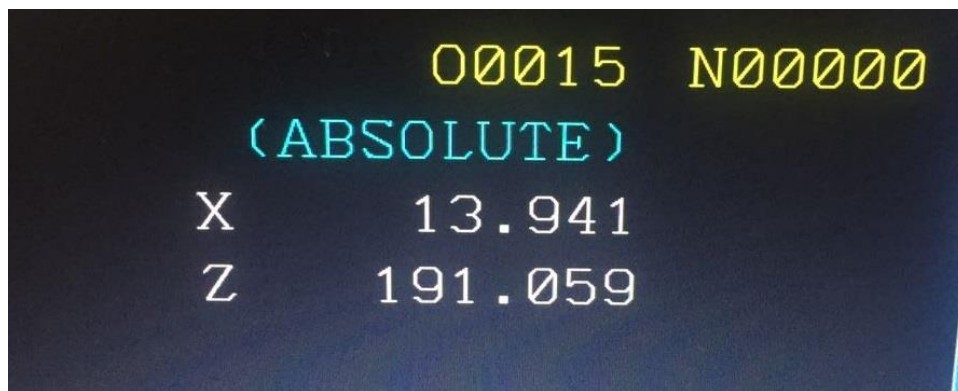


Figura 46 - Coordenadas absolutas do zero peça

Continuando, pode-se dar início a usinagem em si. Para isso, basta ir à primeira linha do programa e apertar o botão de *Start* no teclado da máquina. Deve-se atentar ao uso do óleo lubrificante sempre, pois esse evita um desgaste excessivo da ferramenta e uma elevação na temperatura da peça, o que poderia alterar algumas propriedades do material. Na Figura 47, pode ser visto o começo da usinagem do corpo de prova e na Figura 48, o formato final do mesmo após a usinagem.



Figura 47 - Usinagem do corpo de prova



Figura 48 - CP após a usinagem

Terminada a usinagem, as duas últimas etapas são exclusivamente para dar acabamento ao CP. Primeiramente deve ser cortado o pedaço sobressalente da barra inicial, o qual era necessário para a fixação da peça na placa. Para isso, deve se inserir o corpo de prova dentro da placa, uma vez que agora ele tem menos de 16 mm e prendê-lo pela região da garra (Figura 49). Pode-se usar toda a região sobressalente com a mesma pastilha utilizada na confecção do CP ou, caso tenha um incerto de canal, o corte pode ser feito com ele (Figura 49). Para isso, deve-se alinhar a pastilha com o lado esquerdo do sobremetal e com um avanço baixo, realizar o corte manualmente, sempre usando óleo refrigerante.

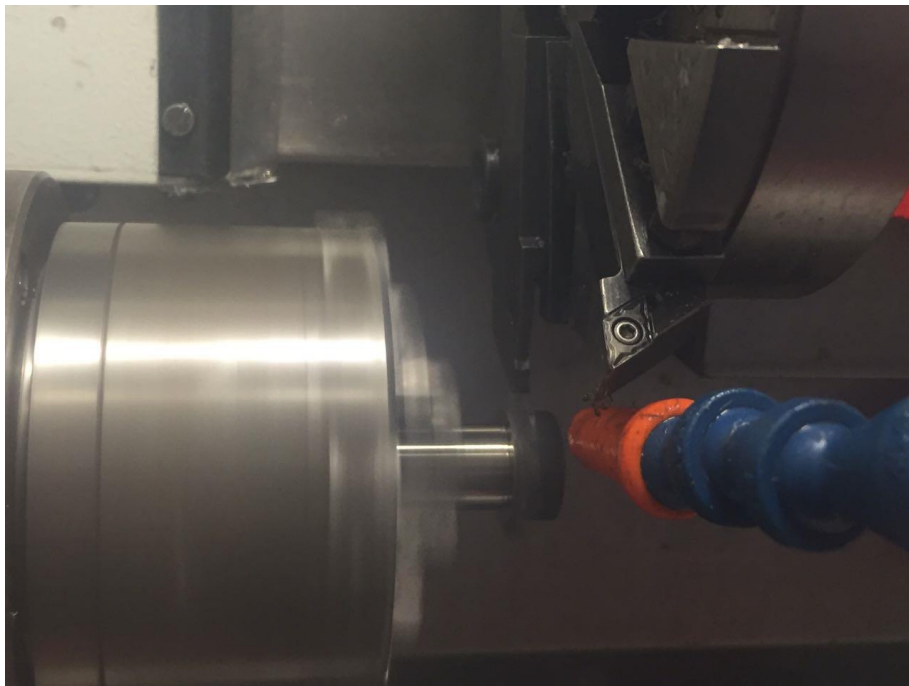


Figura 49 - Corte usando ferramenta de canal

O polimento é a etapa final da confecção do corpo de prova. Às vezes não é necessário, mas, em geral, precisa-se polir o CP para reduzir a sua rugosidade a um nível aceitável. Para tal, deve-se utilizar um torno mecânico, pois essa etapa é manual, o operador tem que lixar a peça e o torno CNC não funciona com a porta aberta, por questões de segurança. Primeiramente, é recomendado o uso de uma lixa folha d'água com uma granulometria de 400 grãos/cm² levemente, a fim de se diminuir a profundidade dos maiores sulcos na peça. Em seguida, utilizar uma lixa do mesmo tipo com uma granulometria de 600 e depois uma de 1200 aplicando mais força, como pode ser visto na Figura 50. Deve-se, também, utilizar uma velocidade de rotação elevada, para um melhor acabamento. Dessa forma, nesse caso, trabalhou-se com a maior possível do torno disponível, 2000 rpm.

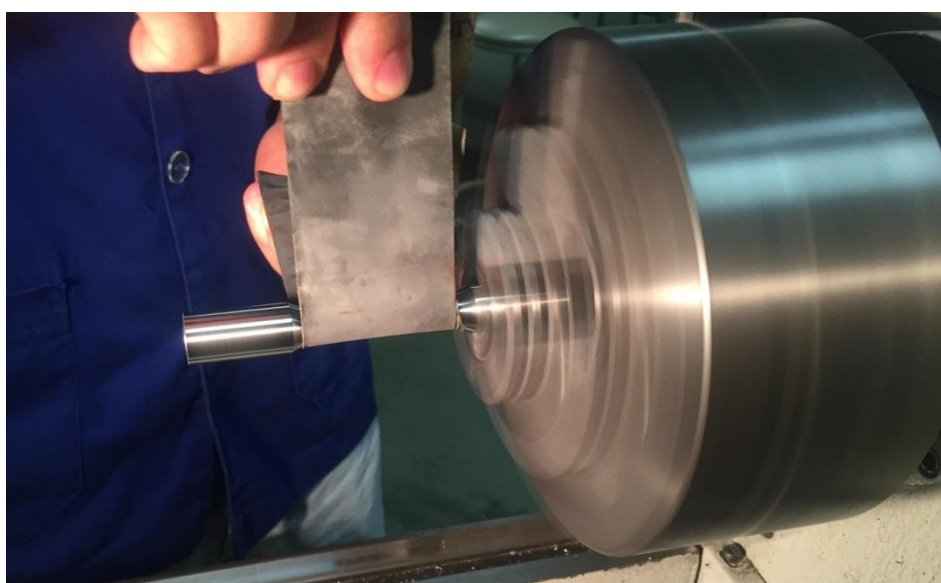


Figura 50 – Polimento

4.2. CORPO DE PROVA VAZADO

O processo de confecção do corpo de prova vazado é bem semelhante ao do entalhado, por ambos serem cilíndricos e fabricados no torno CNC. A primeira etapa é o corte da barra. Recomenda-se que o tarugo cortado tenha entre 125 e 130 mm, para ter o sobremetal necessário para a fixação na máquina e evitar um desperdício excessivo. A realização do furo de centro é idêntica ao CP anterior. A fixação no torno também será realizada por castanhas ligadas ao eixo árvore, no lado esquerdo e pelo contra-ponta no lado direito, porém, nesse caso, como a região de usinagem é ligeiramente menor, pode ser deixado aproximadamente 117 mm entre os elementos de fixação (Figura 51).



Figura 51 - Fixação do CP cilíndrico vazado

Feita a fixação corretamente, o zero peça é feito da mesma forma, encostando o incerto na face lateral do tarugo, coletando o valor da coordenada Z absoluta e inserindo no programa. Após essa etapa, pode-se começar a usinagem do CP, lembrando sempre de usar o óleo refrigerante. Terminada a usinagem, deve-se realizar o corte do sobremetal utilizado na fixação e, se necessário, pode ser feito o polimento no torno mecânico. Até essa etapa, o processo de confecção dos dois corpos de prova foi praticamente idêntica, porém, para a fabricação do CP vazado, ainda deve ser feita a furação.

A primeira tentativa de se realizar o furo foi utilizando uma broca de 10 mm de diâmetro no torno CNC. Aproveitando a fixação utilizada para a realização do corte do sobremetal, para a realização do furo manualmente, foi dado o comando *T0606 S700 M03 X0*, onde *T0606* é a chamada da ferramenta

que está localizada na posição 6, $S700$ é a velocidade de rotação escolhida, $M03$ é o sentido de rotação, anti-horário, para a furação e $X0$ para a torre descer até o centro da peça (Figura 52) Utilizou-se um avanço de $0,02$ mm/rot, tomando o cuidado de retornar a broca à posição inicial a cada 15 mm de furação, para uma melhor refrigeração da ferramenta e da peça. Ao finalizar a furação, foi obtida uma excentricidade visivelmente maior do que a recomendada pela norma (Figura 53), além de uma elevação da temperatura da peça, visível pela cor escura que a broca adquiriu.

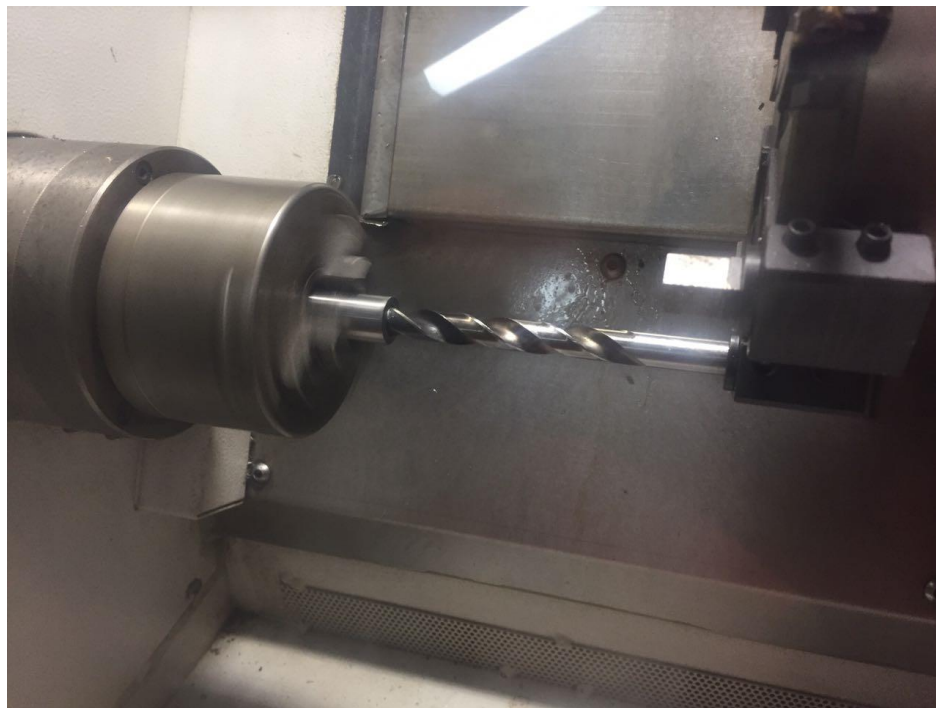


Figura 52 - Início da usinagem com a broca de 10 mm



Figura 53 - Primeiro corpo de prova vazado obtido, com o furo visivelmente fora de centro

A partir disso, buscou-se novas opções para solucionar o problema. A primeira foi utilizar uma sequência de brocas, a fim de se diminuir o esforço na ferramenta. Desta forma, a ideia foi realizar a furação primeiramente com uma broca de 6 mm, em seguida uma de 8 mm e por fim uma de 10 mm. Porém, outro impecílio surgiu. Por ser um processo automatizado, o operador não tem controle do esforço que é realizado sobre a ferramenta. Assim, mesmo com um avanço baixo e com o uso de óleo refrigerante, a broca de 6 mm quebrava aproximadamente no meio do CP, devido ao longo comprimento da peça (Figura 54).



Figura 54 - Broca de 6 mm quebrada em três partes

A fim de se ter um maior controle do processo de furação, optou-se por continuar realizando a furação utilizando uma sequência de ferramentas, primeiro uma broca de 6 mm, depois uma de 8 mm, uma de 9,8 mm (Figura 55) e por fim, um alargador de 10 mm de diâmetro (Figura 56) para dar um acabamento final no furo. Porém, pela dureza relativamente elevada do material que estava sendo usinado (260 HB), não foi possível passar a ferramenta até o final. Entrando em contato com o fornecedor, foi informado que alargadores são recomendados para furos de até 20 mm de comprimento. Desta forma, optou-se pela utilização de uma fresa de ponta esférica de 10 mm para dar um acabamento melhor na região interna do furo (Figura 57), porém, agora no torno mecânico convencional. Com essas duas alterações, tomando os mesmos cuidados de retirar a broca de dentro da peça a cada 15 mm de furo para uma melhor refrigeração e utilizar um avanço baixo conseguiu-se finalizar a confecção do corpo de prova vazado com uma excentricidade menor que a definida pela norma (Figura 58).



Figura 55 - Sequência de brocas utilizada



Figura 56 - Alargador de 10 mm utilizado



Figura 57 - Fresa de ponta esférica de 10 mm



Figura 58 - CP cilíndrico vazado

4.3. CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO EM MÁQUINA DE TRAÇÃO

O processo de fabricação do corpo de prova de cisalhamento em máquina de tração é diferente dos outros dois, pois esse será feito utilizando o centro de usinagem CNC e não mais um torno. Devido à limitações nas ferramentas disponíveis, foi confeccionado um CP apenas como demonstração do passo-a-passo e não será feita a qualificação dimensional, uma vez que estas estarão completamente erradas. Foi utilizada uma fresa de topo reta com 6 mm de diâmetro para se fazer o contorno do CP e também os entalhes centrais. O material utilizado será o aço SAE 4340, onde o formato original disponível são barras de 1 m de comprimento e 29 mm de diâmetro.

O primeiro passo na fabricação desses corpos de prova também é fazer o corte da barra. Utilizando uma serra de fita horizontal, deve-se cortar um tarugo com um comprimento de aproximadamente 250 mm, uma vez que o CP possui 200 mm e é necessário um sobremetal de pelo menos 25 mm em cada extremidade da peça, para ser feita a fixação desta na máquina (Figura 59). Finalizado o corte, necessita-se uma chapa plana para a confecção da peça, desta forma, deve-se usinar a barra até que está possua uma espessura de 6,3 mm (dimensão final do corpo de prova) (Figura 60).



Figura 59 - Corte da barra

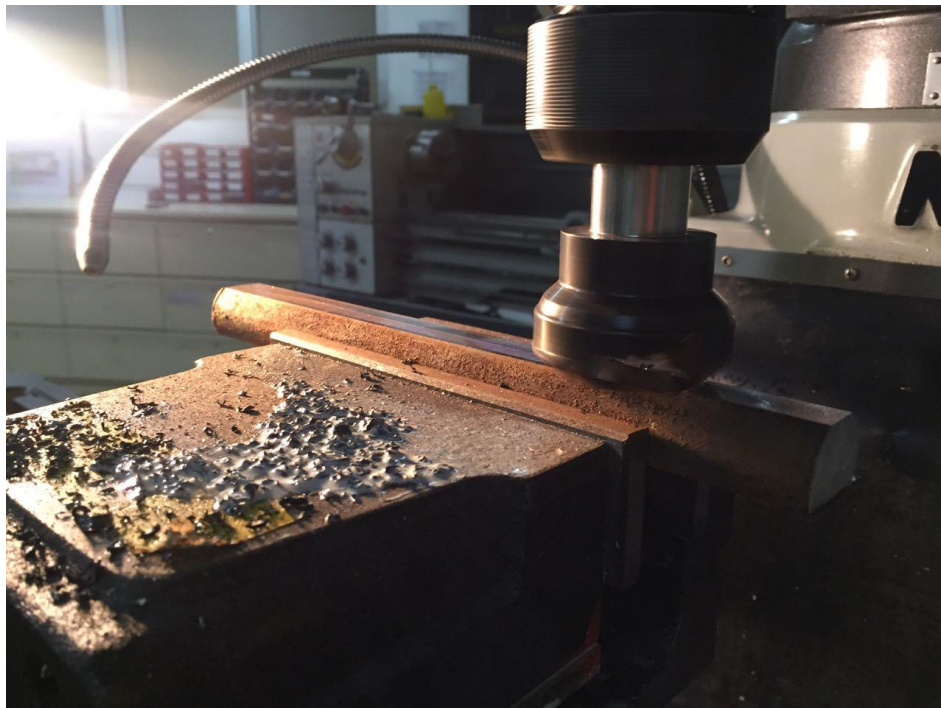


Figura 60 - Usinagem do tarugo bruto

Com a nova chapa, já na espessura correta, pode-se dar início à usinagem do CP em si. Para isso, deve ser feita a fixação da peça à mesa do centro de usinagem, utilizando calços para se garantir o paralelismo entre a chapa e o barramento e um par de parafusos que irão prender a peça (Figura 61). Recomenda-se a utilização de um relógio apalpador para se garantir o alinhamento da peça com os

eixos coordenados, porém, com a indisponibilidade dessa ferramenta, esse alinhamento foi feito apenas visualmente, o que não é tão prejudicial para o resultado final, pois será usinado o contorno da chapa, garantindo dimensões corretas na largura do corpo de prova, caso o alinhamento não esteja muito errado.



Figura 61 - Fixação da chapa

A próxima etapa na fabricação da peça é o zero peça. Utilizando o painel de controle, deve-se encontrar as coordenadas do centro da chapa. Para isso, é recomendada a utilização de um *bip* eletrônico que emite um som ao tocar à peça. Devido à indisponibilidade dessa ferramenta, será utilizado um método manual. Deve-se posicionar a ferramenta até uma altura abaixo da face superior da peça e movimentar a mesa até que um pedaço de papel posicionado entre a fresa e a face lateral da peça fique preso (Figura 62 – a) e b)). Deve-se ler o valor dessa coordenada no painel e movimentar o barramento 17,5 mm (metade do largura da chapa mais o raio da ferramenta) no sentido negativo (Figura 62 – c) e d)). Esse é o centro da peça no eixo Y, logo, é a origem do CP nessa direção e seu valor deve ser zerado (Figura 62 – e) e f)). Para isso, deve-se digitar “X0” no painel e apertar a tecla “*PRESET*”, de modo que o valor dessa coordenada será 0 a partir disso. De modo semelhante, determina-se a origem no eixo X. Para a direção Z, é necessário apenas encostar a ferramenta na face superior da peça e zerar a coordenada. Definida a origem da peça, movimentar-se a torre verticalmente para cima. Em seguida, os valores dessas coordenadas devem ser informados ao programa. Para isso,

na tela *OFFSET*, pressiona-se a tecla referente ao item *WORK* no painel. Na tela que aparecer, deve-se posicionar o cursor sobre a coordenada X da coluna G54, digitar “X0”, apertar a tecla referente a *MEDIR* e fazer o mesmo para as outras duas direções (Figura 63).

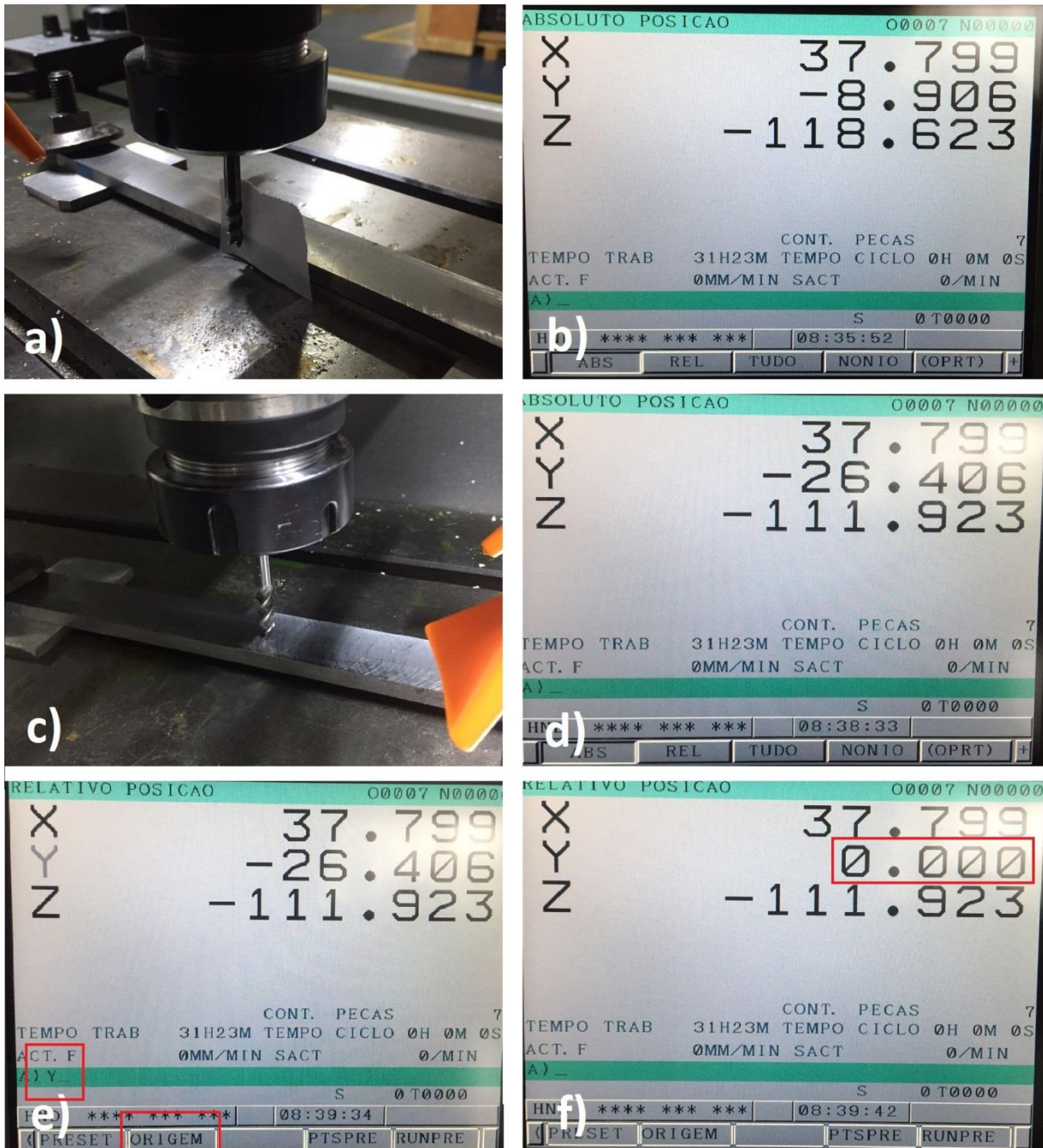


Figura 62 - a) e b) Determinação da coordenada em "y" da lateral da chapa; c) e d) Determinação das coordenadas do centro da chapa; e) e f) Determinação do zero peça

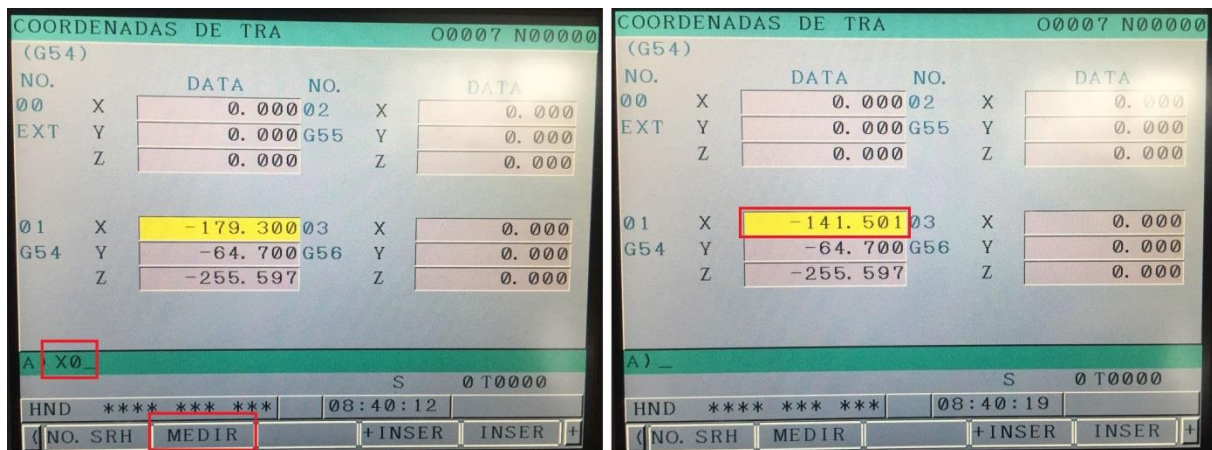


Figura 63 - Finalização do zero peça

Terminado o zero peça, deve-se selecionar a primeira linha do programa, na tela *PROG* e apertar o botão verde, dando início à usinagem do CP, lembrando sempre de utilizar óleo solúvel. Após finalizada essa etapa, será obtido o corpo de prova com as conexões nas extremidades utilizadas para a fixação. Em seguida, deve-se cortar esse sobremetal, processo que pode ser feito manualmente, obtendo a geometria final do CP (Figura 64).



Figura 64 - CP de cisalhamento em máquina de tração finalizado

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CORPO DE PROVA ENTALHADO

Em um primeiro momento, foram confeccionados dois CP's entalhados com raio de 5 mm, um normalizado e outro recozido, utilizando os mesmos parâmetros de corte em ambos (Tabela 9), a fim de se determinar a influência do tratamento térmico no acabamento superficial do material. Primeiramente, foi dado um polimento em ambos os corpos de prova utilizando uma lixa de 400 grãos/cm². Após feita a medição da rugosidade, observou-se que esta apresentava valores acima do determinado por norma e que o recozido possuía um acabamento ligeiramente melhor que o normalizado (Tabela 10). Na tentativa de se obter uma rugosidade dentro do que é determinado pela norma americana, foi dado um novo polimento com uma lixa de 600 grãos/cm² e foi observado que os valores praticamente não sofreram alteração. Esse fato ocorre devido à severidade do entalhe, o qual dificulta o polimento na região. A partir disso, deve-se procurar novas alternativas para a obtenção de um acabamento superficial melhor em CP's entalhados. Também foi feita a conferência dimensional dos mesmos, onde obteve-se valores dentro das tolerâncias pré-determinadas (Tabela 11).

Tabela 9 - Parâmetros de corte utilizados na confecção dos dois primeiros CP's

Material e tipo de CP	Desbaste		Acabamento		Profundidade de corte (mm)
	Velocidade de corte (mm/min)	Avanço (mm/rot)	Velocidade de corte (mm/min)	Avanço (mm/rot)	
Entalhado 5 mm 4340 recozido	200	0,15	400	0,08	0,5
Entalhado 5 mm 4340 normalizado	200	0,15	400	0,08	0,5

Tabela 10 - Rugosidade obtida para os dois primeiros CP's

Material e tipo de CP	Rugosidade	
	Lixa 400	Lixa 600
Entalhado 5 mm 4340 recozido	2,000	1,974
Entalhado 5 mm 4340 normalizado	2,206	2,170

Tabela 11 - Conferência dimensional dos dois primeiros CP's

Material e tipo de CP	Dimensões		
	Raio do Entalhe (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Entalhado 5 mm 4340 recozido	5,019	8,02	68,05
Entalhado 5 mm 4340 normalizado	5,041	8,01	68,10

A partir dos dados obtidos, foram confeccionados mais dois CP's semelhantes aos anteriores. A fim de se analisar a influência no acabamento superficial da peça e evitar um desgaste excessivo da ferramenta, reduziu-se a velocidade de corte no acabamento, mantendo-se constante os outros parâmetros (Tabela 12). Optou-se por utilizar por realizar a medição da rugosidade apenas depois do polimento com a lixa de 600 grãos/cm² e observou-se que foram obtidos valores ligeiramente menores do que os anteriores (Tabela 13). Portanto, como foi obtido um melhor resultado, com um desgaste menor da ferramenta, fixou-se esses valores dos parâmetros de corte para a confecção dos corpos de prova seguintes. Também foi realizada a conferência dimensional dos novos CP's, porém, na tentativa de obtenção de um acabamento superficial melhor, após a realização do acabamento no torno CNC para o corpo de prova recozido, foi dado o comando para que esse último passe fosse repetido, o que provocou um erro nas dimensões finais da peça (Tabela 14), provavelmente devido à uma possível folga entre as engrenagens da máquina.

Tabela 12 – Parâmetros de corte utilizados na fabricação dos outros CP's

Material e tipo de CP	Desbaste		Acabamento		Profundidade de corte (mm)
	Velocidade de corte (mm/min)	Avanço (mm/rot)	Velocidade de corte (mm/min)	Avanço (mm/rot)	
Entalhado 5 mm 4340 normalizado	200	0,15	300	0,08	0,5
Entalhado 5 mm 4340 recozido	200	0,15	300	0,08	0,5

Tabela 13 – Rugosidade obtida para os outros CP's entalhados com raio de 5 mm

Material e tipo de CP	Rugosidade	
	Lixa 400	Lixa 600
Entalhado 5 mm 4340 normalizado	-	1,953
Entalhado 5 mm 4340 recozido	-	1,864

Tabela 14 – Conferência dimensional dos outros CP's entalhados com raio de 5 mm

Material e tipo de CP	Dimensões		
	Raio do Entalhe (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Entalhado 5 mm 4340 normalizado	5,001	7,98	68,00
Entalhado 5 mm 4340 recozido	5,119	7,95	68,10

Juntamente com esses últimos CP's, foram fabricados dois com entalhe de 3 mm utilizando os mesmos parâmetros de corte utilizados (Tabela 12). Nesse caso, diferentemente dos anteriores, foi obtido um valor de rugosidade menor para o normalizado (Tabela 15). Isso ocorreu porque foram fabricados em conjunto com os anteriores e, seguindo a mesma lógica, foi dado o comando para a realização do acabamento duas vezes, porém, nesse caso, para o CP normalizado. Pode-se observar

então que obtém-se redução do valor da rugosidade com a realização do último passe novamente, porém, provoca-se alteração nas dimensões, como pode-se observar na Tabela 16, onde o raio do entalhe está maior do que a tolerância permite. Ainda na Tabela 15, pode ser observado que a redução no raio do entalhe, provocou um aumento na rugosidade do mesmo, quando comparado com os anteriores, corroborando a tese de que quanto maior a severidade do entalhe, mais difícil será a realização do polimento na região, provocando uma perda de qualidade no acabamento superficial.

Tabela 15 - Rugosidade dos CP's entalhados com raio de 3 mm

Material e tipo de CP	Rugosidade	
	Lixa 400	Lixa 600
Entalhado 3 mm 4340 normalizado	-	2,560
Entalhado 3 mm 4340 recozido	-	2,834

Tabela 16 - Conferência dimensional dos CP's entalhados com raio de 3 mm

Material e tipo de CP	Dimensões		
	Raio do Entalhe (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Entalhado 3 mm 4340 normalizado	3,332	8,01	68,00
Entalhado 3 mm 4340 recozido	3,014	8,00	68,10

Na sequência de fabricação, foram feitos mais dois CP's, um recozido e outro normalizado, esses com entalhe de 14 mm de raio. Seguindo a mesma lógica anterior, os parâmetros de corte foram mantidos (Tabela 12), de modo que seja possível observar a dificuldade na obtenção de uma rugosidade dentro da norma na região do entalhe. Em ambos foi dado um polimento usando as lixas de 400 e 600 grãos/cm² (Tabela 17) e, como esperado, o padrão se repetiu: o recozido apresentou uma rugosidade menor do que o normalizado e obteve-se valores menores que os outros CP's, uma vez que o entalhe é menos severo, porém, ainda bem acima do estipulado em norma. Corrigido o erro do duplo acabamento, os corpos de prova com entalhe de 14 mm apresentaram dimensões dentro das tolerâncias determinadas (Tabela 18).

Tabela 17 – Rugosidade dos CP's entalhados com raio de 14 mm

Material e tipo de CP	Rugosidade	
	Lixa 400	Lixa 600
Entalhado 14 mm 4340 normalizado	-	0,921
Entalhado 14 mm 4340 recozido	-	0,858

Tabela 18 – Dimensões dos CP's entalhados com raio de 14 mm

Material e tipo de CP	Dimensões		
	Raio do Entalhe (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Entalhado 14 mm 4340 normalizado	14,015	8,00	67,95
Entalhado 14 mm 4340 recozido	14,022	7,98	68,00

Portanto, para se confeccionar corpos de prova entalhados, deve-se determinar os parâmetros de corte ideais para cada material, partindo da composição química e da dureza de cada um e levando-se em consideração o acabamento superficial final, o desgaste da ferramenta e o tempo de fabricação. Definidos esses valores, deve-se dar início à fabricação em si e ao final, realizar o polimento utilizando uma sequência de lixas, se possível, com uma granulometria maior que 600 grãos/cm², a fim de garantir uma rugosidade dentro do que é especificado pela norma em todo o CP, exceto para a região do entalhe, onde deve-se buscar novas alternativas de acabamento, pois a utilização de lixas é ineficaz.

5.2. CORPO DE PROVA VAZADO

A partir da fabricação de corpos de prova cilíndricos lisos utilizando o aço inox 304L, determinou-se, principalmente através de uma análise qualitativa do acabamento superficial, os parâmetros de corte ideais para esse material que foram mantidos constantes na fabricação dos cinco CP's vazados (Tabela 19). Pode-se observar que, em comparação com o aço 4340, houve uma redução na velocidade de corte no desbaste da peça e um aumento no acabamento. Também reduziu-se a profundidade de corte em 20%. A primeira e a terceira alterações se deram com o objetivo de diminuir o desgaste da ferramenta, porém, houve um aumento no tempo gasto na fabricação, o que não é tão prejudicial, uma vez que foram fabricados apenas 5 CP's. O aumento da velocidade de corte no acabamento foi necessário para a obtenção de um acabamento superficial espelhado, o que foi possível, principalmente, devido ao baixo teor de carbono na sua composição, diferente do aço 4340, onde não se obteve um acabamento assim antes do polimento.

Tabela 19 - Parâmetros de corte utilizados na confecção dos CP's vazados

Desbaste		Acabamento		Profundidade de corte (mm)
Velocidade de corte (mm/min)	Avanço (mm/rot)	Velocidade de corte (mm/min)	Avanço (mm/rot)	
150	0,15	350	0,08	0,4

Foi feita a conferência dimensional dos corpos de prova fabricados, onde obteve-se valores dentro das tolerâncias determinadas, exceto o diâmetro interno que apresentou valores um pouco acima, devido às características das ferramentas utilizadas, o que não é prejudicial em termos de pesquisa,

uma vez que apresentaram valores muito próximos um do outro. Os CP's apresentaram uma excentricidade dentro do estipulado em norma, onde o valor máximo deveria ser da ordem de 0,04, mostrando a eficácia da metodologia de confecção criada. Na Tabela 20 é possível observar também, de forma indireta, o desgaste da ferramenta, uma vez que o diâmetro do quinto corpo de prova apresentou um aumento de 0,2 mm em relação ao primeiro. Tal comparação não foi possível de ser feita nos CP's entalhados porque não foram fabricados no mesmo dia, então, entre um e outro, houve a utilização do torno para outras atividades.

Tabela 20 - Conferencia dimensional dos CP's vazados

Material e tipo de CP	Dimensões			
	Excentricidade	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
Vazado Inox 304 L – 1	0,0204	10,05	12,00	55,05
Vazado Inox 304 L – 2	0,0192	10,10	12,00	55,10
Vazado Inox 304 L – 3	0,0385	10,05	12,01	55,05
Vazado Inox 304 L – 4	0,0095	10,05	12,01	54,90
Vazado Inox 304 L – 5	0,0097	10,05	12,02	54,95

Por fim, foi feita uma aferição da rugosidade (Tabela 21). Para os três primeiros CP's, mediu-se após o polimento com a lixa de 400 grãos/cm² onde obteve-se valores acima de 0,2 e observou-se o acabamento superficial estava piorando com o aumento do desgaste da ferramenta, portanto, tornando-se desnecessária a medição dos outros dois corpos de prova após o polimento com essa lixa. Para obter um acabamento superficial dentro do especificado na norma, foi necessária a utilização de uma lixa de 600 grãos/cm². Obteve-se valores abaixo de 0,2 para os cinco corpos de prova e observou-se que o aumento da rugosidade devido ao desgaste da ferramenta se repetiu, com exceção do último, no qual foi dado polimento durante aproximadamente o dobro do tempo dos outros quatro, a fim de se determinar a influência desse parâmetro no resultado final. Desta forma, é possível concluir que o tempo de polimento é um item importante no processo, uma vez que, investindo o dobrando este, houve uma redução de aproximadamente 50% no valor da rugosidade.

Tabela 21 - Rugosidade dos CP's vazados

Material e tipo de CP	Rugosidade	
	Lixa 400	Lixa 600
Vazado Inox 304 L - 1	0,314	0,141
Vazado Inox 304 L - 2	0,501	0,162
Vazado Inox 304 L - 3	0,640	0,179
Vazado Inox 304 L - 4	-	0,181
Vazado Inox 304 L - 5	-	0,087

Portanto, observou-se que a metodologia criada para a fabricação dos corpos de prova vazados é eficiente, uma vez que atingiu-se valores aceitáveis para todos os itens da conferência dimensional, inclusive para a rugosidade, diferente dos entalhados, onde não foi possível alcançar valores menores que o especificados pela norma americana.

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi feito um estudo a cerca dos diferentes tipos de corpos de prova que podem ser utilizados para se fazer uma caracterização mecânica dos materiais mais utilizados em pesquisas, abordando as principais normas e os parâmetros de fabricação e de conferência dimensional. Devido ao curto prazo e a falta de recursos financeiros, foi possível a fabricação apenas de dois tipos de CP's cilíndricos, os entalhados e os vazados.

Mostrou-se a importância da integração CAD/CAM na geração do programa para a usinagem e na visualização da simulação, reduzindo possíveis erros na confecção dos corpos de prova e evitando choques inesperados com consequentes quebras de ferramentas. Foi desenvolvida também uma metodologia para a fabricação desses CP's, especificando o passo-a-passo para a obtenção de peças dentro dos limites determinados nos projetos, corrigindo erros que aparecerão dentro do processo.

Para o corpo de prova entalhado, a metodologia de confecção foi bem definida, funcionando com precisão, exceto na obtenção de um acabamento superficial dentro do que é especificado em norma. Não foi possível alcançar níveis de rugosidade abaixo de $0,2 \mu\text{m}$ devido à própria geometria da peça, o que dificultou a realização do polimento na região do entalhe. A partir disso, deve-se buscar novos meios para a melhoria do acabamento superficial ou desenvolver um novo formato para esses CP's em caso de ensaios de fadiga, que exigem níveis muito baixos de rugosidade. Para os outros testes, a qualidade alcançada é satisfatória, não prejudicando os resultados que serão obtidos. O erro que alguns apresentaram nas suas dimensões finais ocorreu devido à realização de um duplo acabamento na finalização da peça, na tentativa de reduzir a rugosidade.

Os corpos de prova vazados se mostraram mais difíceis de serem fabricados, uma vez que esses exigiram a realização de uma furação manual em um torno convencional, após a usinagem no CNC. Também foram necessários alguns ajustes na metodologia de confecção até que fossem atingidos os resultados desejados. Obteve-se valores de rugosidade abaixo de $0,2 \mu\text{m}$, o que era extremamente necessário para esses CP's, pois seriam testados quanto à fadiga. A única dimensão final que ficou maior que a tolerância especificada em projeto foi o diâmetro do furo, o qual apresentou um tamanho cerca de $0,05 \text{ mm}$ maior do que o ideal, fato esse que não influenciará negativamente os resultados do ensaio, pois essa metodologia garantiu uma repetitividade nos valores obtidos para essa dimensão, viabilizando assim possíveis comparações entre os corpos de prova.

Portanto, seguindo a metodologia especificada, é possível se fabricar os CP's descritos e utilizá-la como base para confeccionar os outros tipos descritos na revisão bibliográfica, de acordo com a necessidade de cada pesquisa, realizando sempre a conferência metrológica a fim de validar os resultados obtidos nos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <https://www.ntcbrasil.com.br/blog/os-11-maiores-erros-da-engenharia/> (acessado em novembro, 2017)
- [2] **Engenharia de materiais, v.2: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto** / Michael F. Ashby e David R. H. Jones; tradução de Arlete Simille Marques – Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- [3] <http://forum.outerspace.com.br/index.php?threads/alguns-do-grandes-erros-desastres-e-trag%C3%A9dias-da-engenharia-na-hist%C3%B3ria-fotos-videos.381973/> (acessado em novembro, 2017)
- [4] CARNEIRO, Vinícius Guzmàn Pereira. **INTEGRAÇÃO ENTRE CAD/CAM E GERAÇÃO DE PROGRAMA PARA MÁQUINA CNC**. 2016. 219 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016
- [5] https://plant3d.files.wordpress.com/2011/04/processos_de_usinagem_i_-_aula_01_-_introduc3a7c3a3o.pdf (acessado em fevereiro, 2017)
- [6] https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20I/Usinagem/Aula%205/Parametros_de_corte.pdf (acessado em maio, 2017)
- [7] Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L. (1ª Ed.). **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**
- [8] http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/turning/TURN_B.pdf (acessado em setembro, 2017)
- [9] http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/POR/ROT_D.pdf (acessado em setembro, 2017)
- [10] http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/POR/TUR_A.pdf (acessado em setembro, 2017)
- [11] <http://usinagemsemsegredos.blogspot.com.br/2010/09/> (acessado em setembro, 2017)
- [12] http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/POR/ROT_L.pdf (acessado em setembro, 2017)
- [13] http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/POR/ROT_T.pdf (acessado em setembro, 2017)
- [14] ASTM E606 / E606M – **Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing**
- [15] ABNT NBR ISO 8404 – **Indicação do Estado de Superfície em Desenhos Técnicos**
- [16] ASTM E2207 – **Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin-Walled Tubular Specimens**

[17] ABNT NBR ISO 6892-1 – **Materiais Metálicos – Ensaio de Tração – Parte 1: Método de Ensaio à Temperatura Ambiente**

[18] ZICHIL, V et al. Considerations on stress triaxiality variation for 2P armor steel. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 200, p.012066-012074, maio 2017. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/200/1/012066>

[19] ROQUETE, Guilherme Oliveira. **PROJETO, FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE FADIGA MULTIAXIAL**. 2014. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

[20] Driemeier, L., Brünig, M., Micheli, G., Alves, M., (2009). **Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys**

[21] Teng, X. (2008). **Numerical prediction of slant fracture with continuum damage mechanics. Engineering Fracture Mechanics**

[22] Driemeier, L., Brünig, M., Micheli, G., Alves, M., (2014). **A bifailure specimen for accessing failure criteria performance**

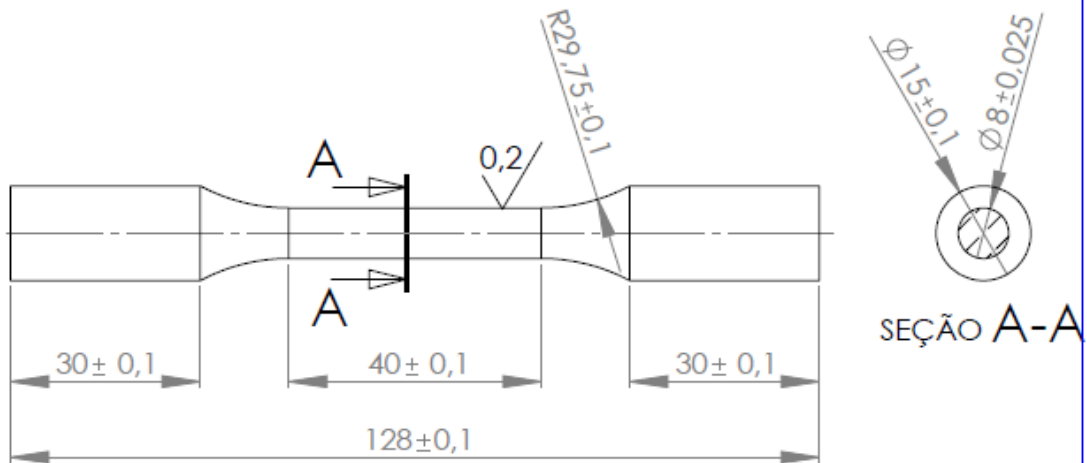
[23] SILVA, Bruno Arruda da. **IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO NUMÉRICO MULTIDIMENSIONAL PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ENCRUAMENTO DE MATERIAIS DÚCTEIS POR ENSAIO DE TRAÇÃO**. 2017. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

[24] CARNEIRO JUNIOR, Luiz Alberto. **ESTUDO EXPERIMENTAL DA PLASTICIDADE CÍCLICA E FADIGA DO AÇO INOXIDÁVEL 304L**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ANEXOS

	Pág
Anexo I	Desenho técnico do CP cilíndrico liso 72
Anexo II	Desenho técnico do CP cilíndrico entalhado com raio de 14 mm 73
Anexo III	Desenho técnico do CP cilíndrico entalhado com raio de 5 mm 74
Anexo IV	Desenho técnico do CP cilíndrico entalhado com raio de 3 mm 75
Anexo V	Desenho técnico do CP cilíndrico vazado 76
Anexo VI	Desenho técnico do CP retangular entalhado com raio de 10 mm 77
Anexo VII	Desenho técnico do CP retangular de cisalhamento em máquina de tração 78
Anexo VIII	Desenho técnico do CP borboleta de cisalhamento em máquina de tração 79
Anexo IX	Desenho técnico do CP de Arcan modificado 80
Anexo X	Desenho técnico do CP de falha dupla 81
Anexo XI	Conferência dimensional do CP entalhado de 5 mm 4340 recozido com lixa 400 82
Anexo XII	Conf. dimensional do CP entalhado de 5 mm 4340 normalizado com lixa 400 83
Anexo XIII	Conf. dimensional do CP entalhado de 5 mm 4340 normalizado com lixa 600 84
Anexo XIV	Conferência dimensional do CP entalhado de 5 mm 4340 recozido com lixa 600 85
Anexo XV	Conf. dimensional do CP entalhado de 5 mm 4340 normalizado com lixa 600 86
Anexo XVI	Conf. dimensional do CP entalhado de 3 mm 4340 normalizado com lixa 600 87
Anexo XVII	Conferência dimensional do CP entalhado de 3 mm 4340 recozido com lixa 600 88
Anexo XVIII	Conf. dimensional do CP entalhado de 14 mm 4340 normalizado com lixa 600 89
Anexo XIX	Conferência dimensional do CP entalhado de 14 mm 4340 recozido com lixa 600 90
Anexo XX	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 1 com lixa 400 91
Anexo XXI	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 1 com lixa 600 91
Anexo XXII	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 2 com lixa 400 92
Anexo XXIII	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 2 com lixa 600 92
Anexo XXIV	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 3 com lixa 400 93
Anexo XXV	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 3 com lixa 600 93
Anexo XXVI	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 4 com lixa 600 94
Anexo XXVII	Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 5 com lixa 600 durante o dobro do tempo 94

ANEXO I: Desenho técnico do corpo de prova cilíndrico liso



Faculdade de Tecnologia - FT
Projeto de Graduação 1

Data: 22/04/2017
Nº de folha : 1

Desenhista:
Vinícius Rodrigues M. Silva 12/0137968

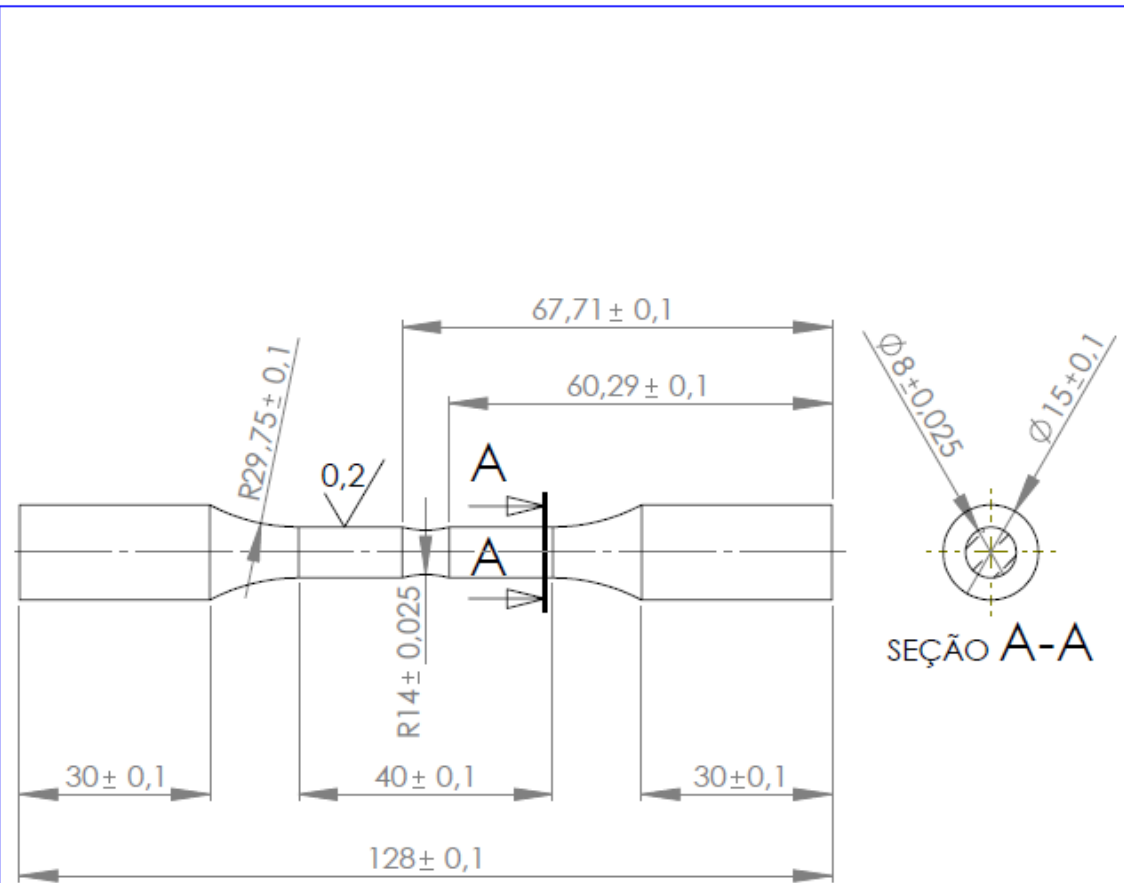
Professor:
Lucival Malcher


Corpo de prova cilíndrico liso

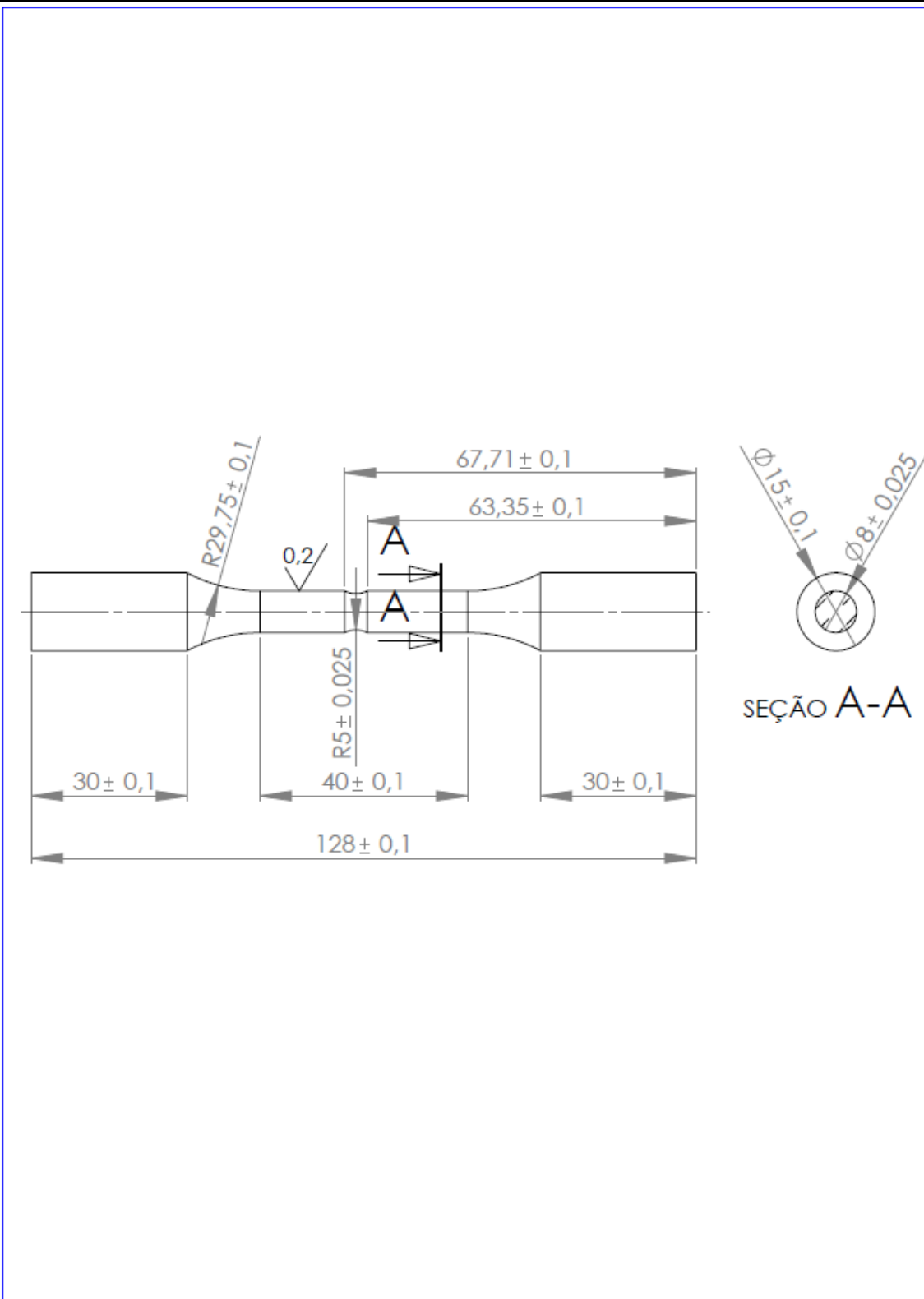
Diedo: 3°


Unidade: mm

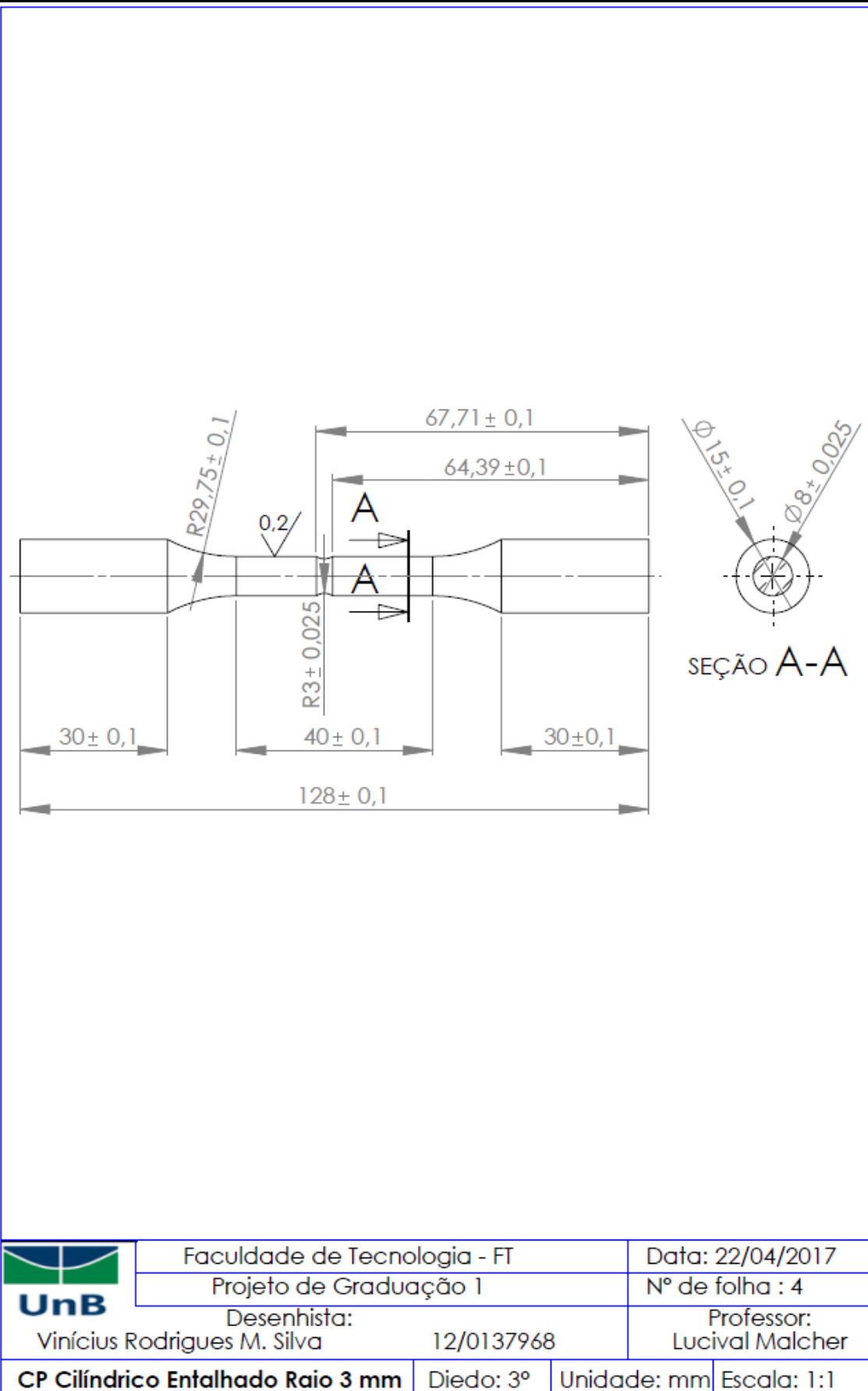
Escala: 1:1



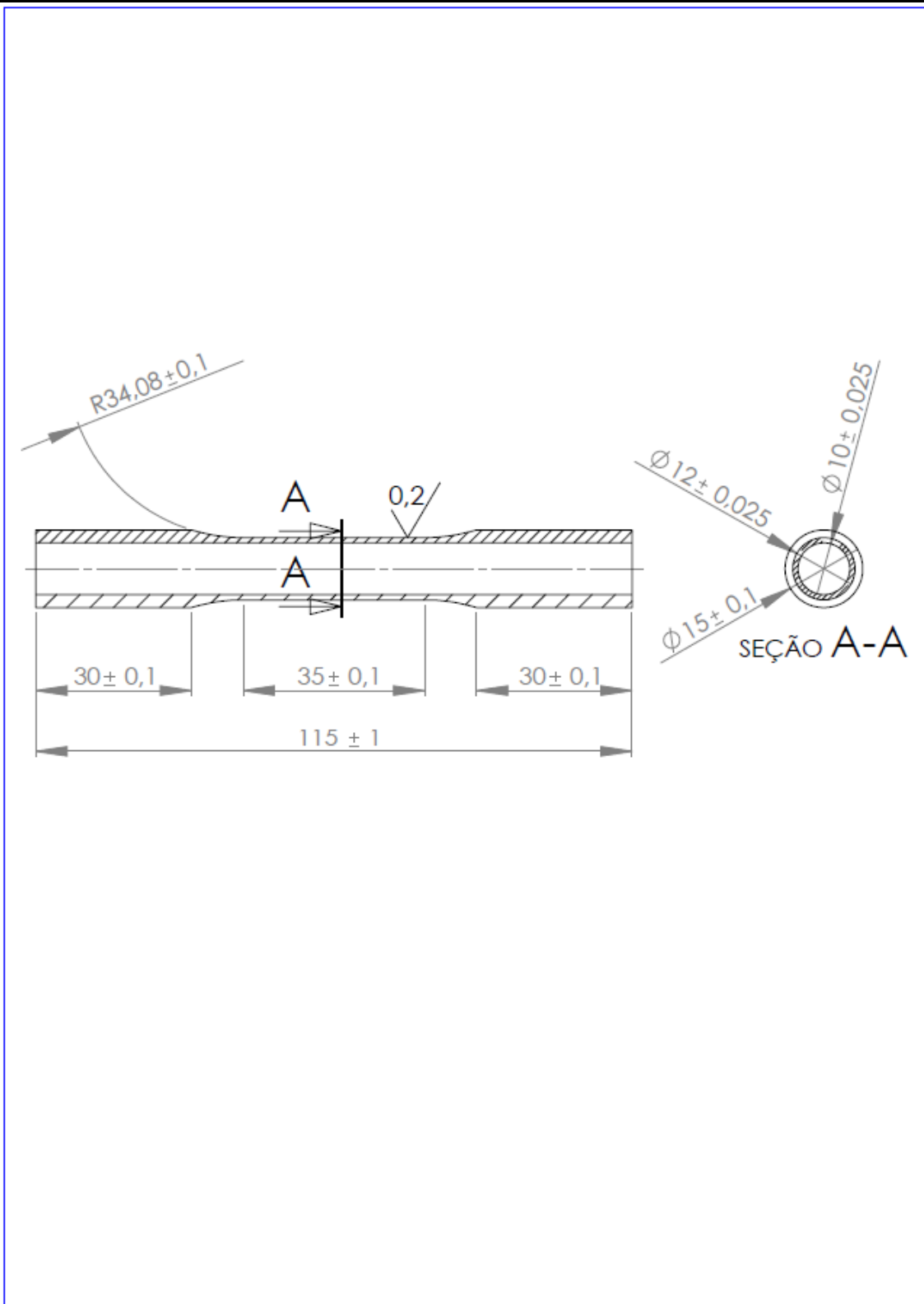
	Faculdade de Tecnologia - FT	Data: 22/04/2017
	Projeto de Graduação 1	Nº de folha : 2
Desenhista: Vinícius Rodrigues M. Silva	12/0137968	Professor: Lucival Malcher
CP Cilindrico Entalhado Raio 14 mm	Diedro: 3°	Unidade: mm Escala: 1:1




	Faculdade de Tecnologia - FT	Data: 22/04/2017
	Projeto de Graduação 1	Nº de folha : 3
Desenhista:	Professor:	
Vinícius Rodrigues M. Silva	12/0137968	Lucival Malcher
CP Cilíndrico Entalhado Raio 5 mm	Diedo: 3°	Unidade: mm Escala: 1:1

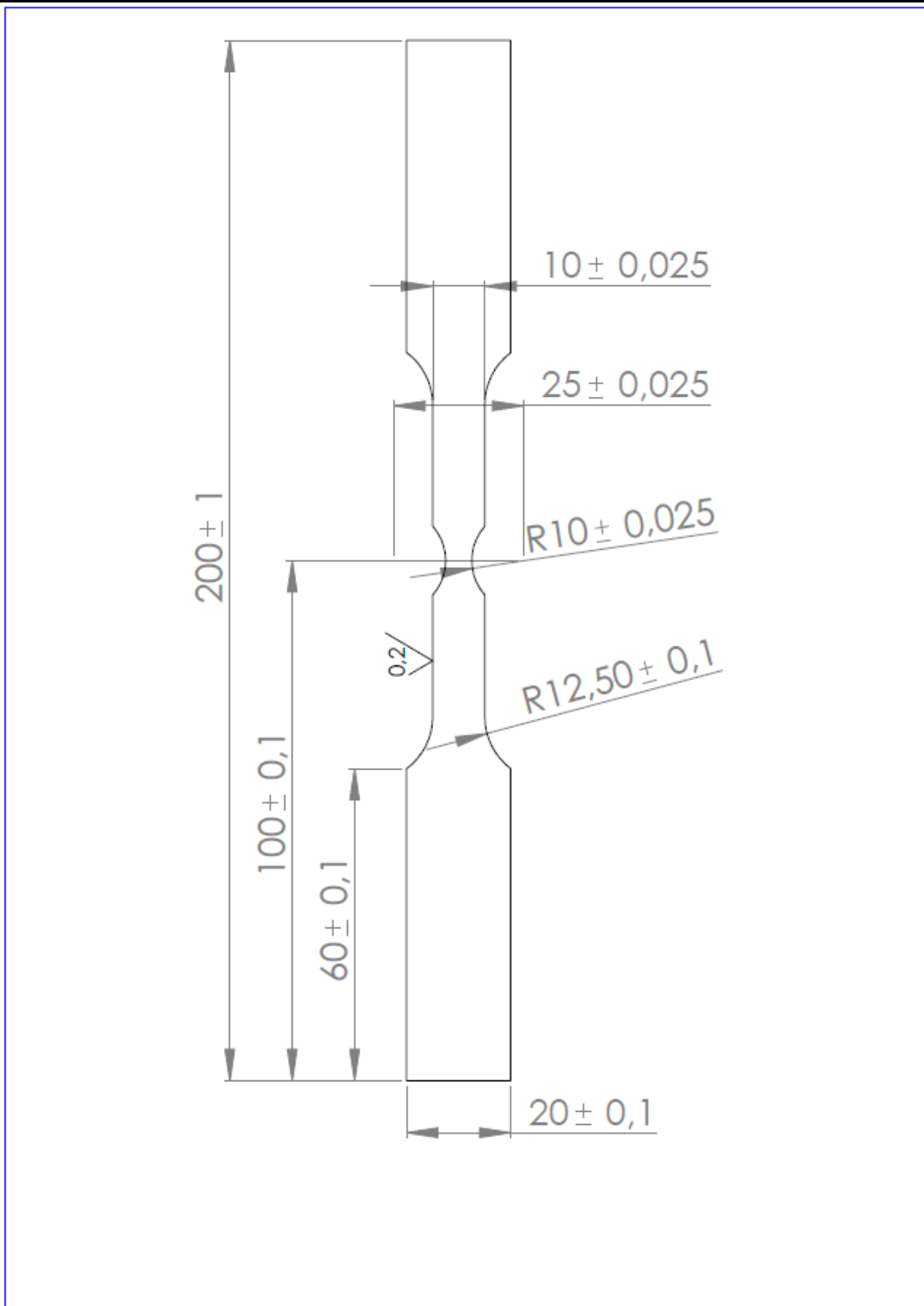



ANEXO V: Desenho técnico do corpo de prova cilíndrico vazado

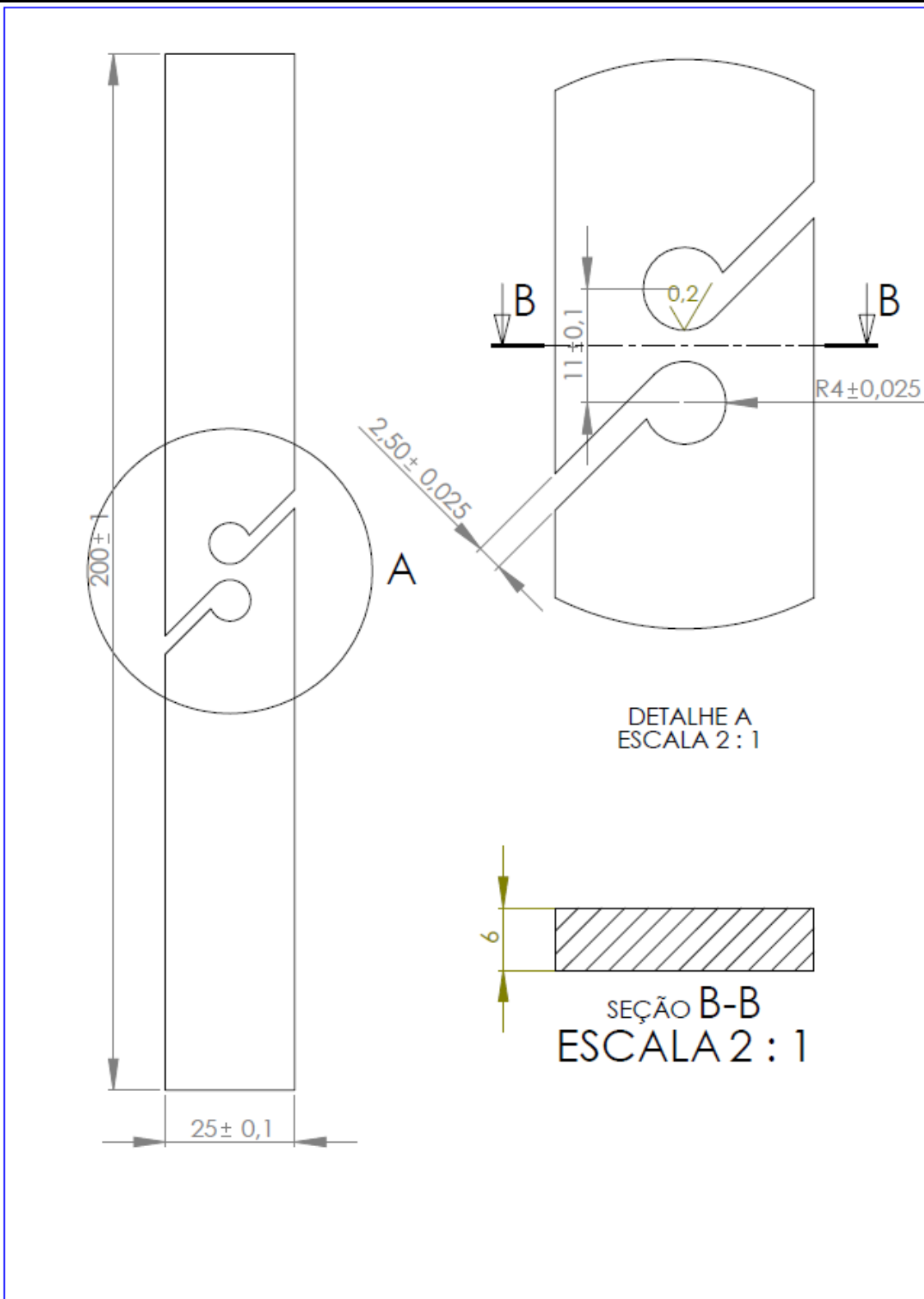



	Faculdade de Tecnologia - FT	Data: 22/04/2017
	Projeto de Graduação 1	Nº de folha : 5
Desenhista: Vinícius Rodrigues M. Silva 12/0137968		Professor: Lucival Malcher
CP Cilíndrico Vazado	Diedo: 3º	Unidade: mm Escala: 1:1

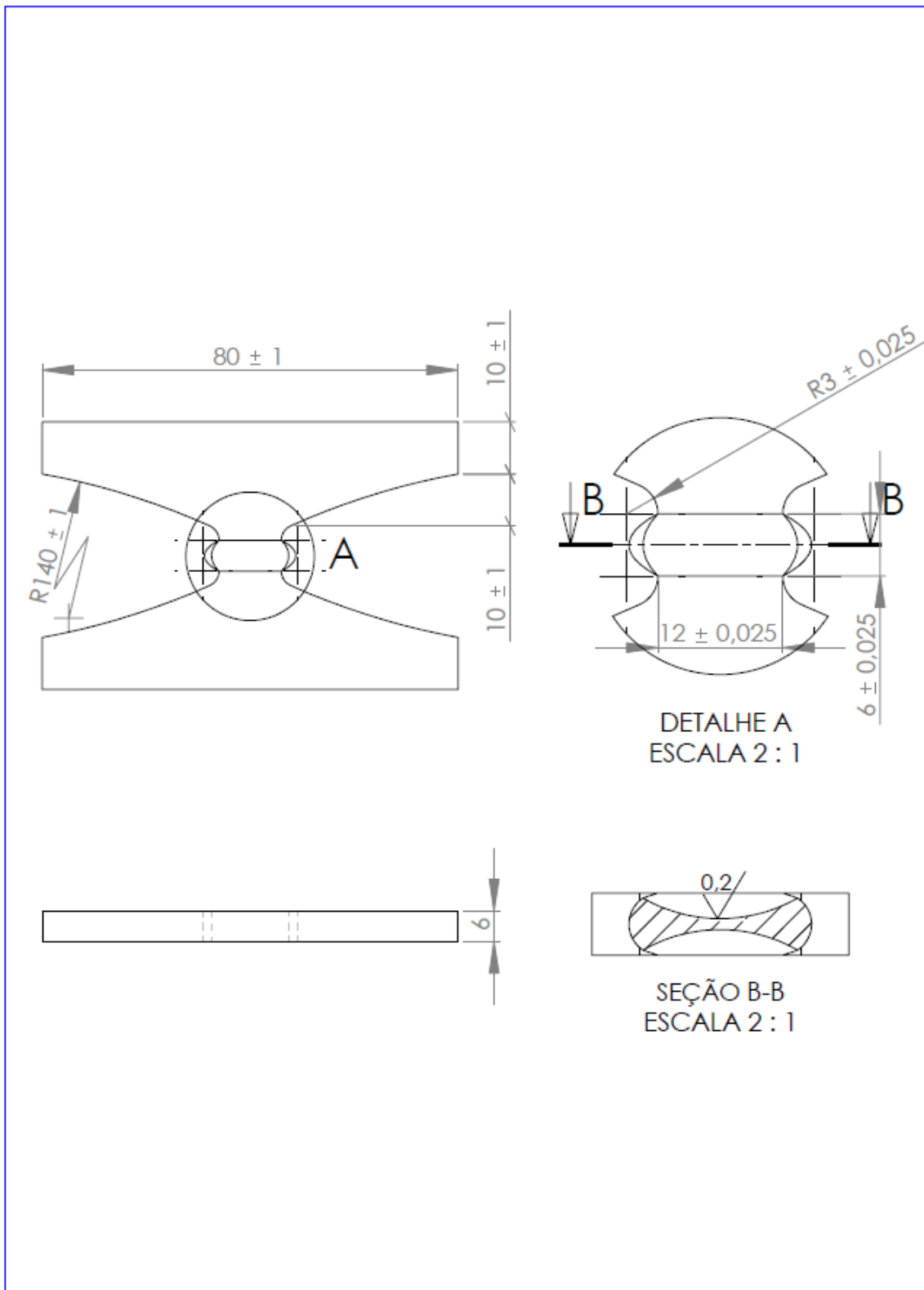
ANEXO VI: Desenho técnico do corpo de prova retangular entalhado com raio de 10 mm




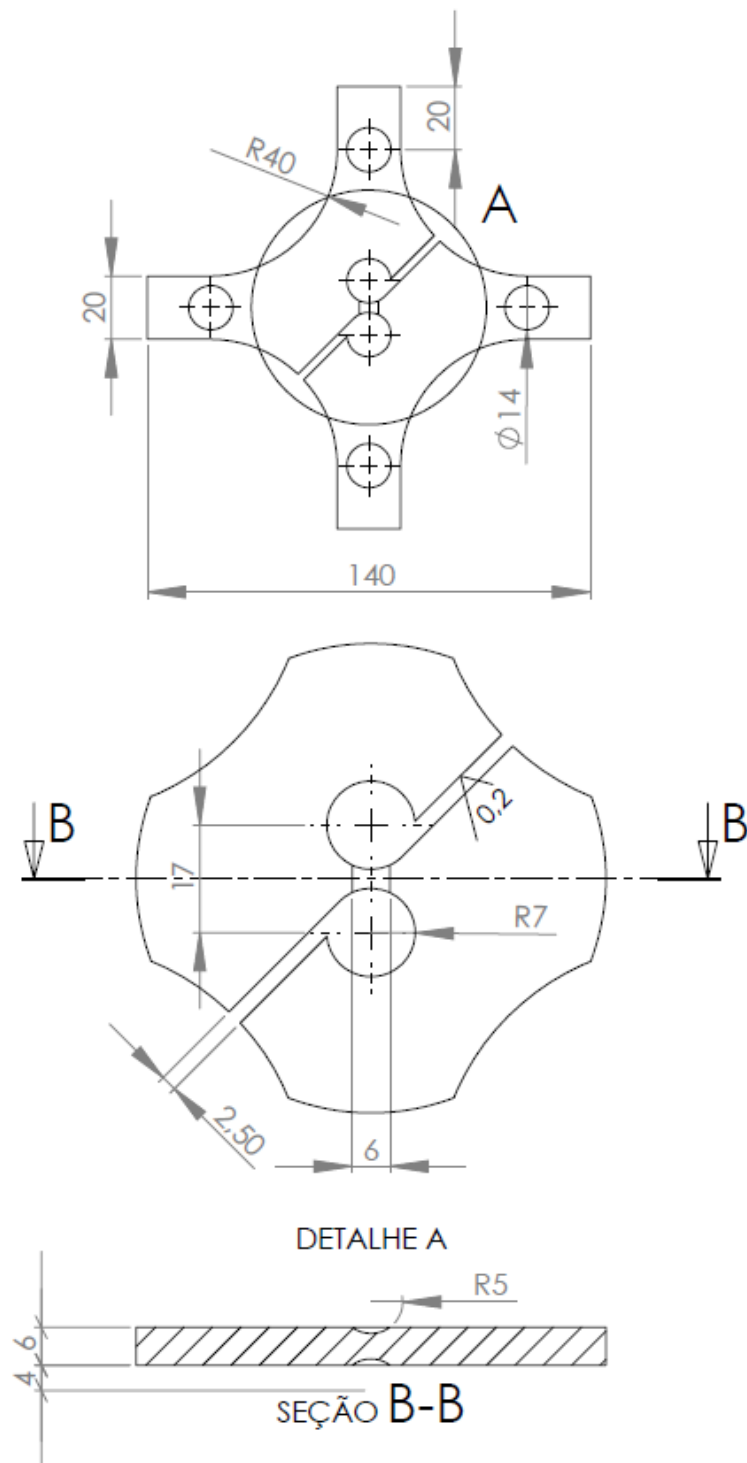
	Faculdade de Tecnologia - FT	Data: 22/04/2017
	Projeto de Graduação 1	Nº de folha : 6
Desenhista: Vinícius Rodrigues M. Silva 12/0137968		Professor: Lucival Malcher
CP Retangular Entalhado	Diedo: 3°	Unidade: mm Escala: 1:1



	Faculdade de Tecnologia - FT	Data: 22/04/2017
	Projeto de Graduação 1	Nº de folha : 7
Desenhista: Vinícius Rodrigues M. Silva 12/0137968		Professor: Lucival Malcher
CP de Cisalhamento p/ ens. Tração	Diedo: 3°	Unidade: mm Escala: 1:1



	Faculdade de Tecnologia - FT	Data: 14/05/2017
	Projeto de Graduação I	Nº de folha : 7
Desenhista: Vinícius Rodrigues M. Silva	12/0137968	Professor: Lucival Malcher
CP Borboleta	Diedo: 3º	Unidade: mm Escala: 1:1



Faculdade de Tecnologia - FT

Data: 22/04/2017

Projeto de Graduação 1

Nº de folha : 10

Desenhista:

Professor:

Vinícius Rodrigues M. Silva

12/0137968

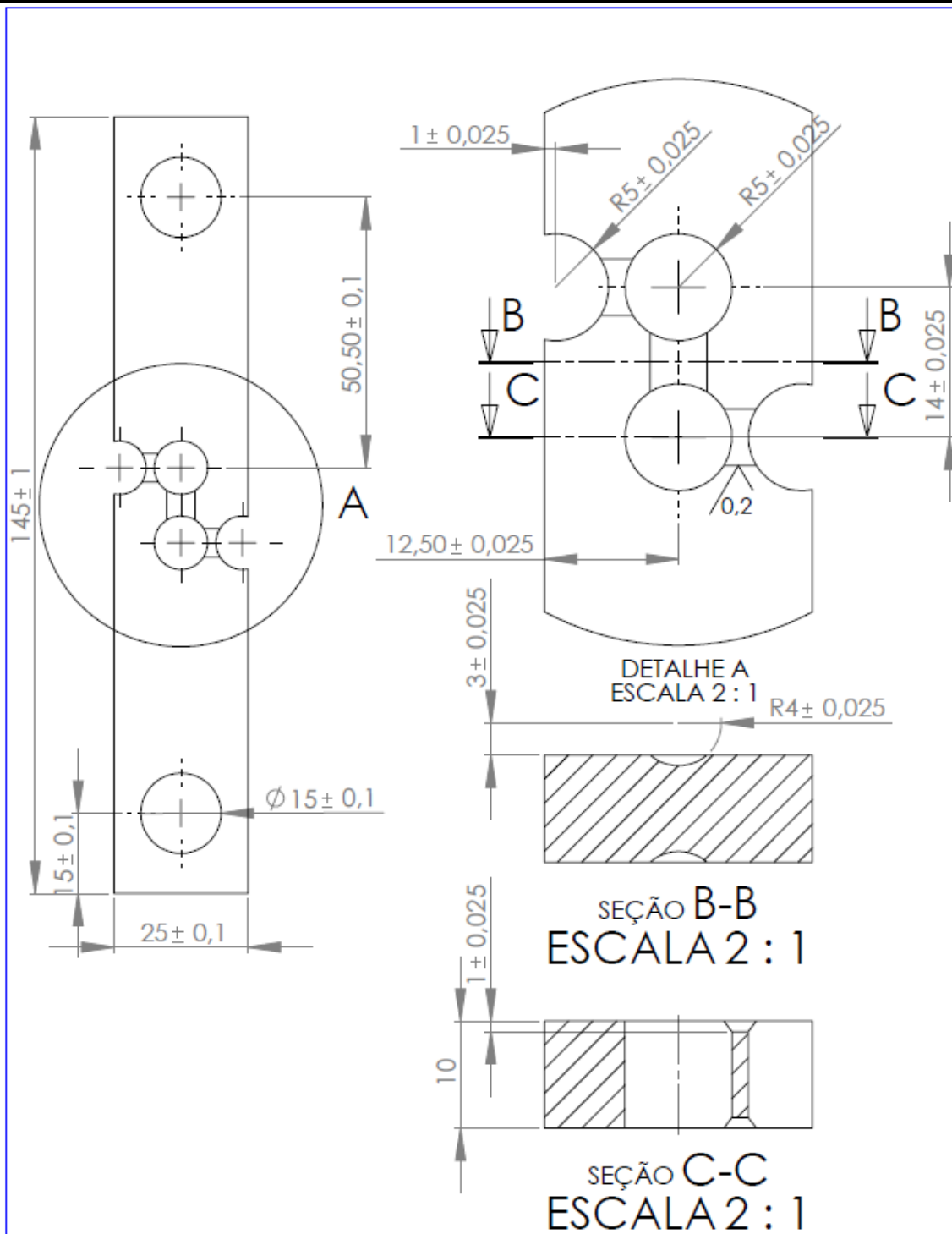
Lucival Malcher

CP de Arcan Modificado

Diedo: 3°

Unidade: mm

Escala: 1:1



Faculdade de Tecnologia - FT
Projeto de Graduação 1

Data: 22/04/2017
Nº de folha : 8

Desenhista:
Vinícius Rodrigues M. Silva

12/0137968

Professor:
Lucival Malcher

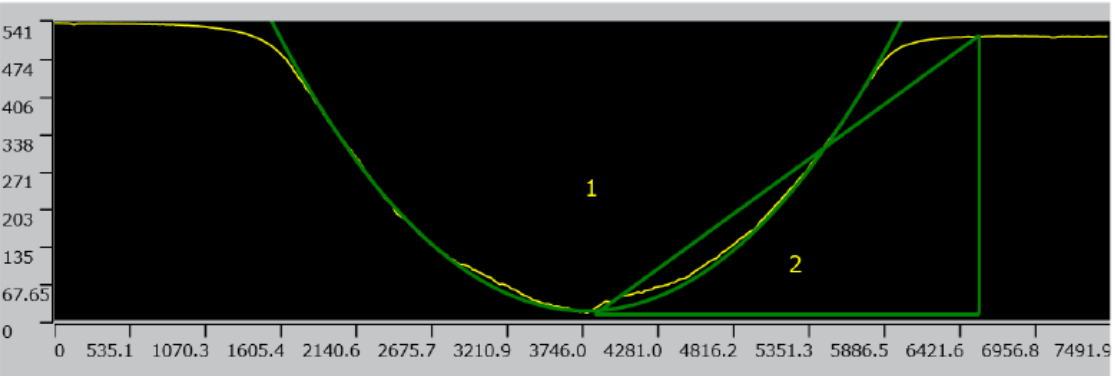
CP de Falha Dupla

Diedro: 3°

Unidade: mm

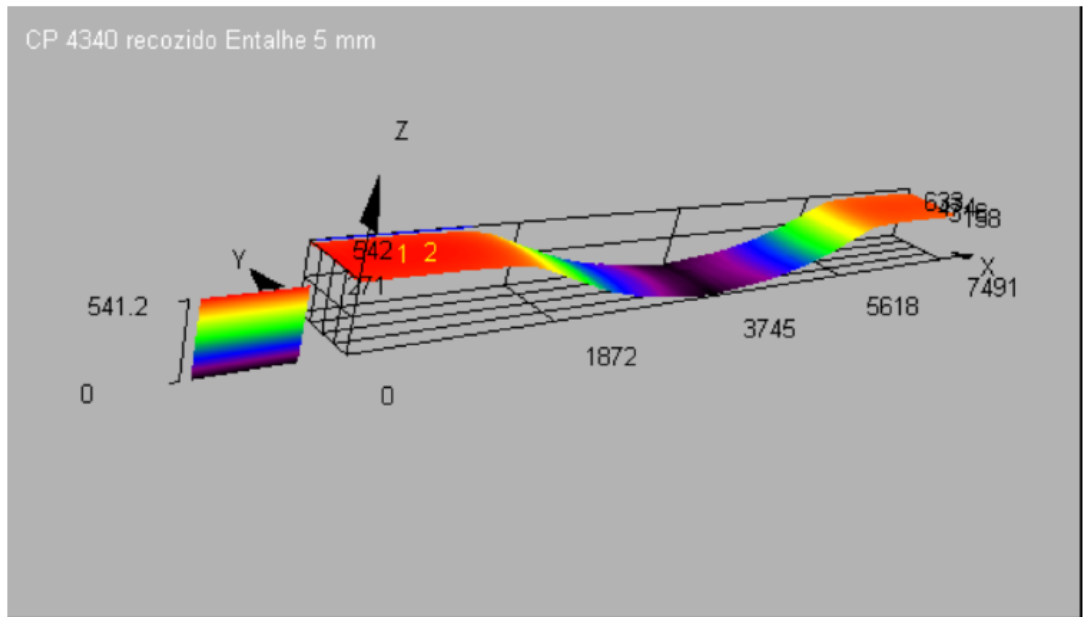
Escala: 1:1

CP 4340 Recozido Entalhe 5 mm

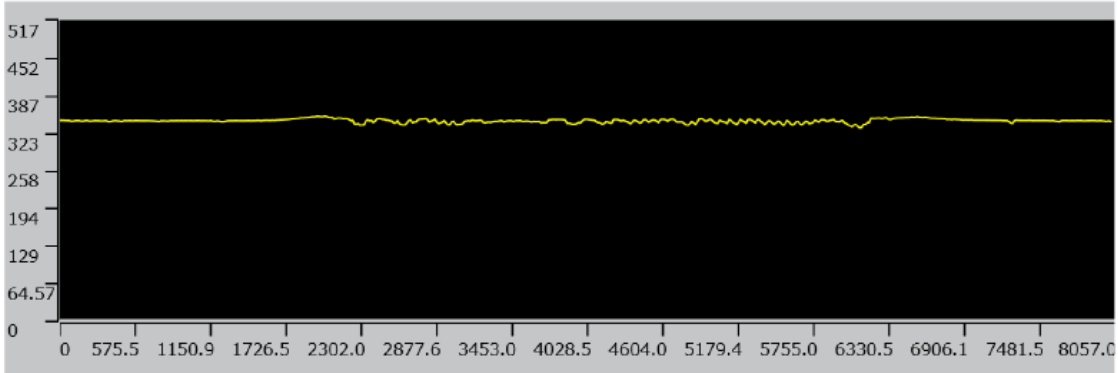
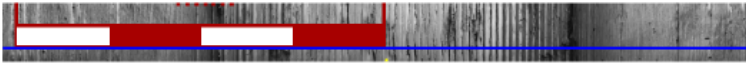


No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4.877	5.124	10.002	4.689	20.459	2.000	800.000

No.	Result	Height[µm]	Radius[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1		5019.499
<input checked="" type="checkbox"/>	2	503.633	-

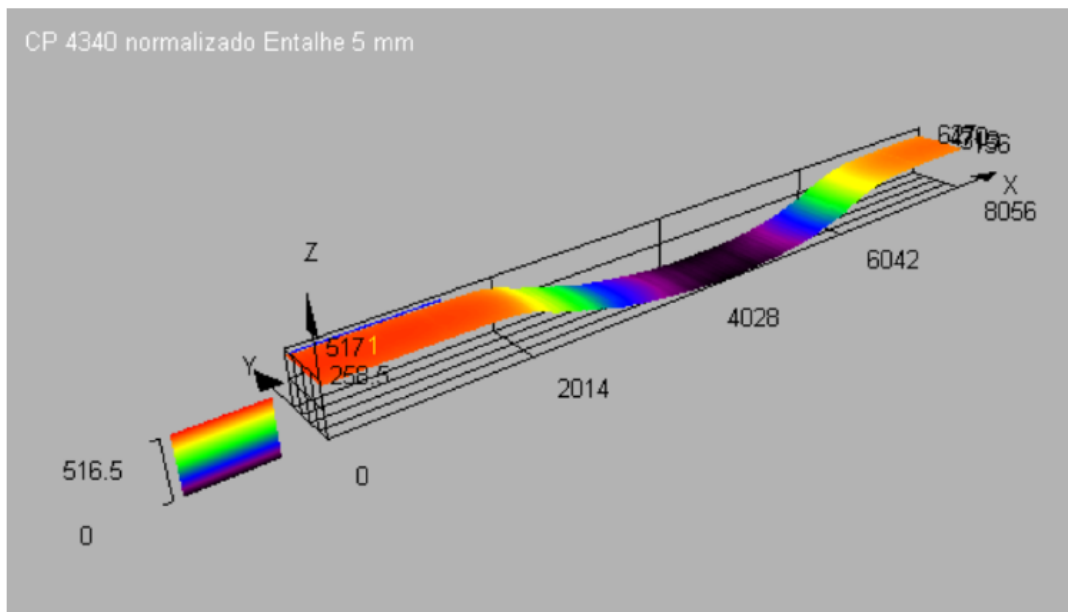


CP 4340 Normalizado Entalhe 5 mm

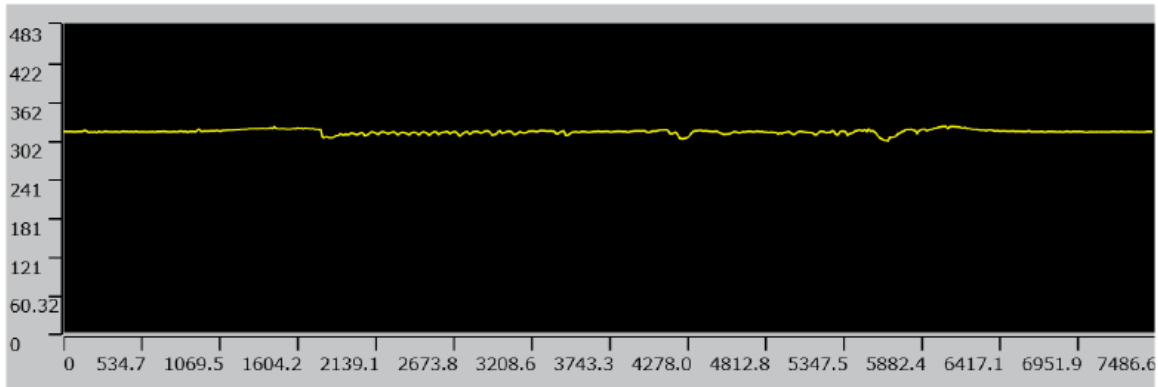
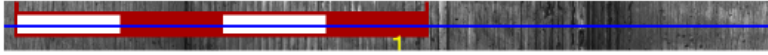


No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	λc [μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4.074	6.72	0.799	6.334	22.840	2.206	800.000

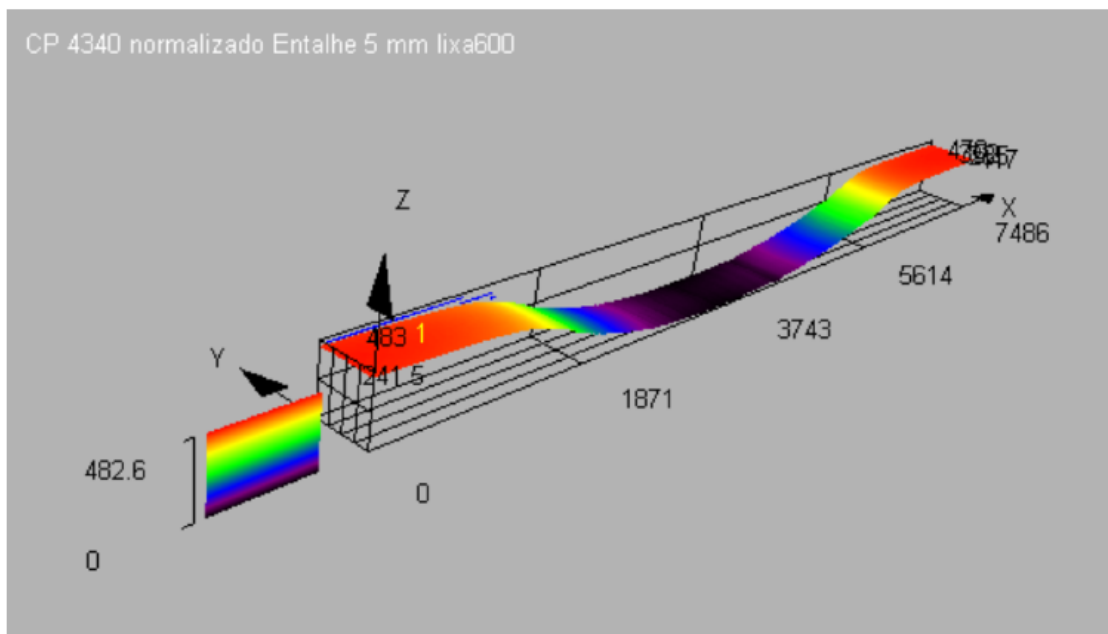
No.	Result	Height[μm]	Radius[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	-	5041.895
<input checked="" type="checkbox"/>	2	88.506	-



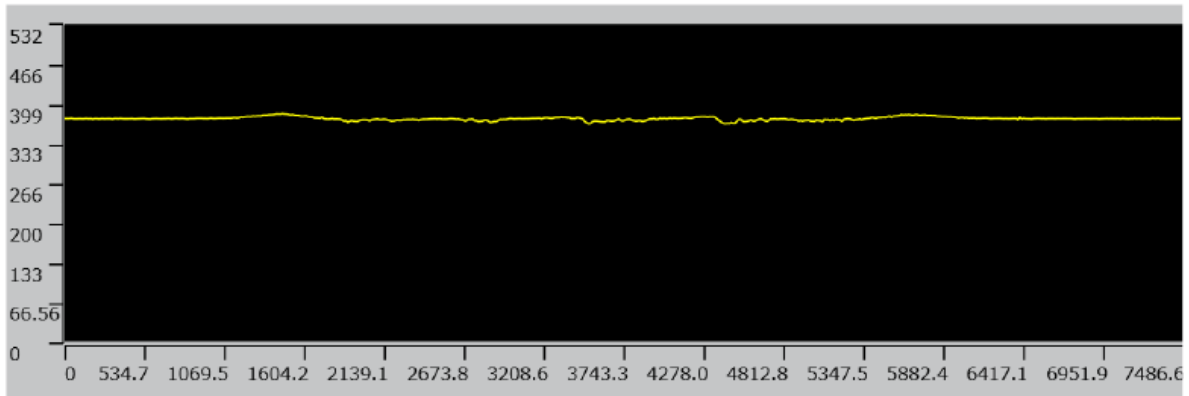
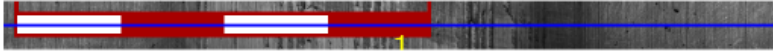
CP 4340 Normalizado Entalhe 5 mm lixa600



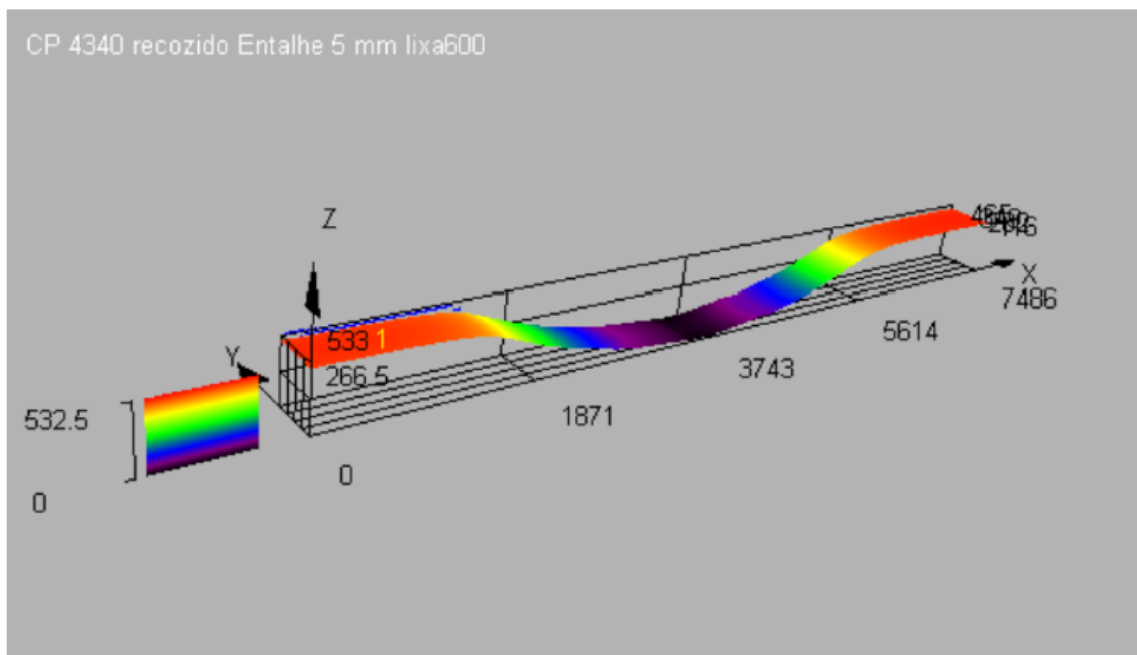
No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	lc[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4.803	7.057	11.860	3.305	24.173	2.170	800.000



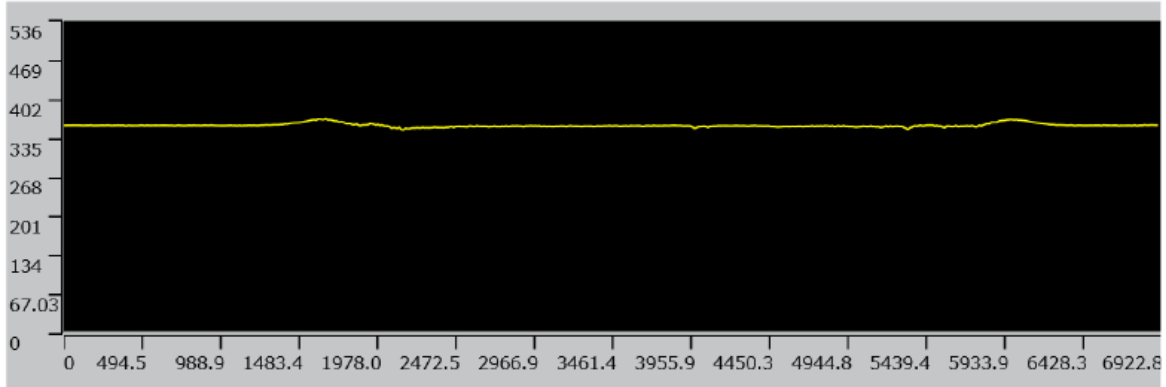
CP 4340 Recozido Entalhe 5 mm Lixa 600



No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	λc [μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4.718	4.790	9.508	1.228	18.229	1.974	800.000

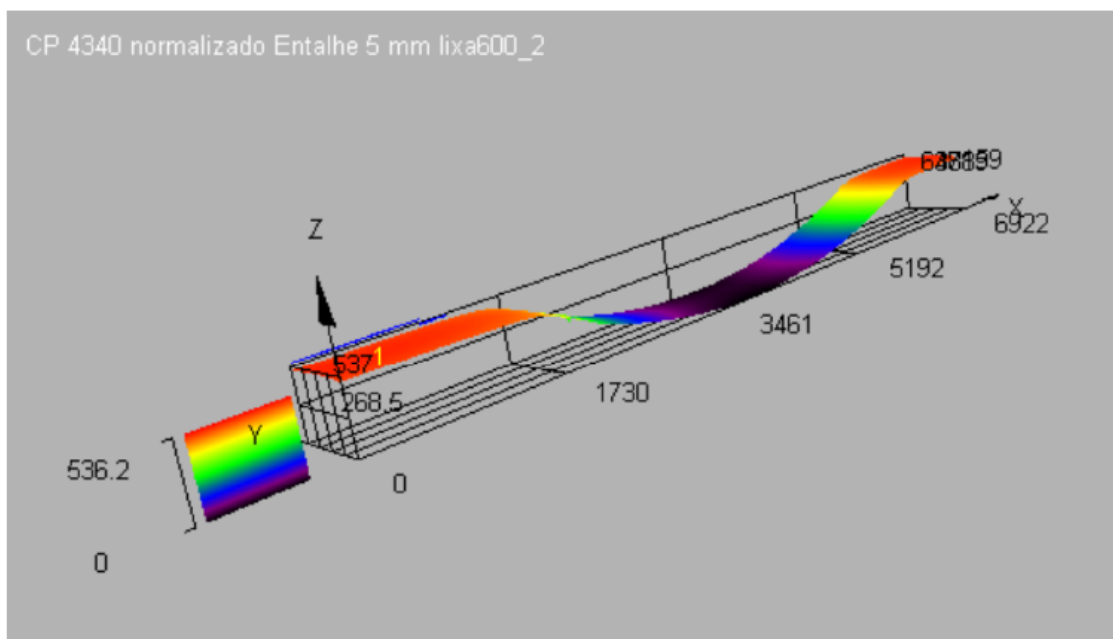


CP 4340 normalizado entalhe 5mm lixa 600

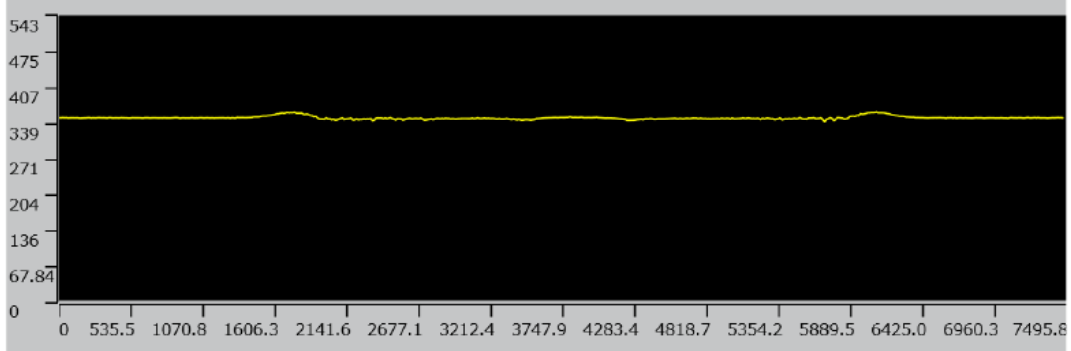
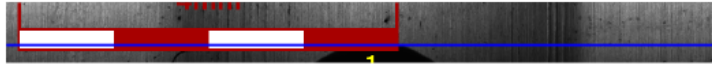


No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	λc [μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4.602	4.462	9.065	0.000	21.046	1.953	800.000

No.	Result	Height[μm]	Radius[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	500.072	-
<input checked="" type="checkbox"/>	2	-	5001.899

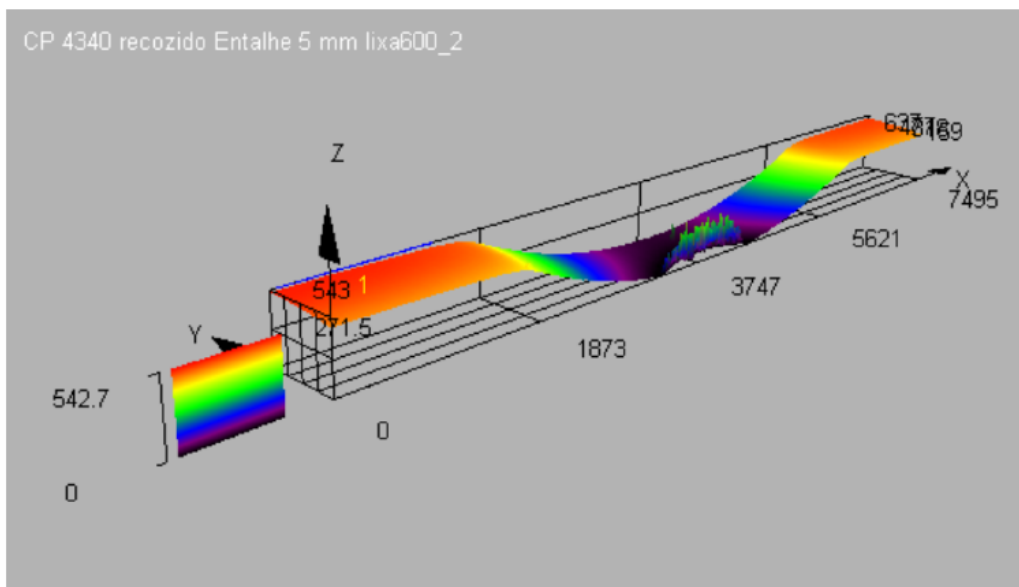


CP 4340 recozido entalhe 5mm lixa 600

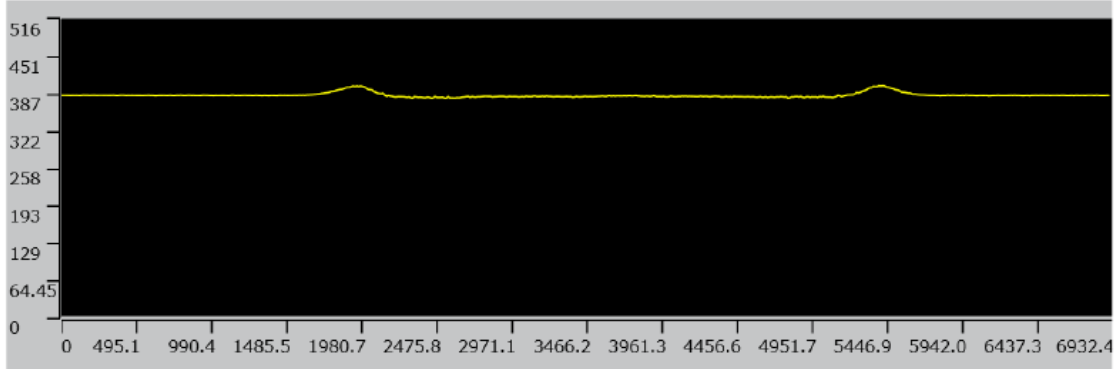
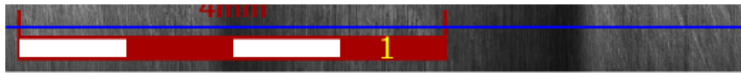


No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	λc[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	6.907	4.014	10.921	0.211	33.548	1.864	800.000

No.	Result	Height[μm]	Radius[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1		5119.346
<input checked="" type="checkbox"/>	2		493.524

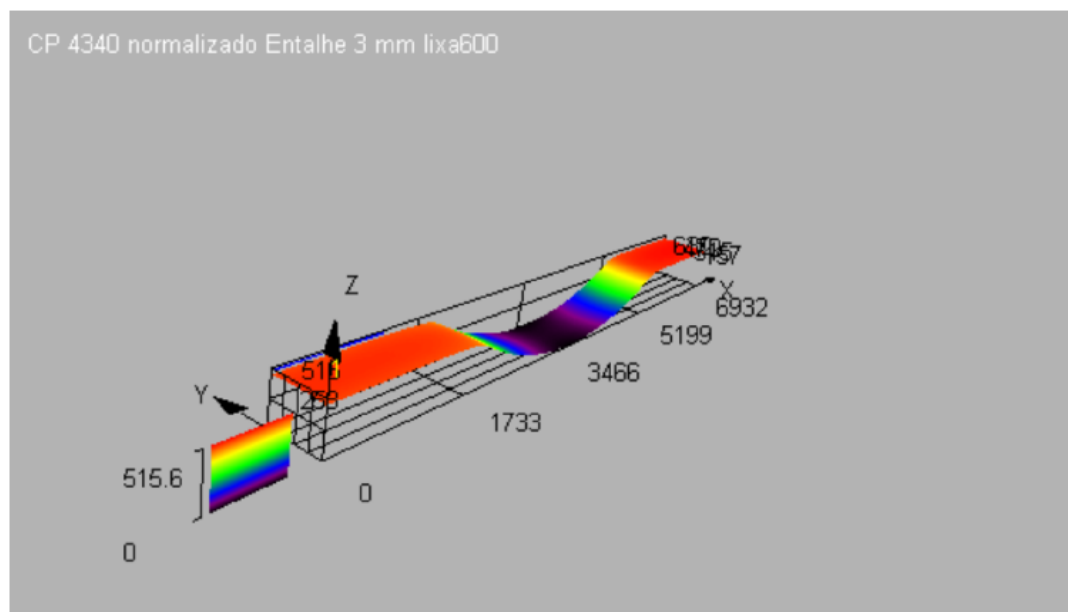


CP 4340 normalizado entalhe 3mm lixa 600

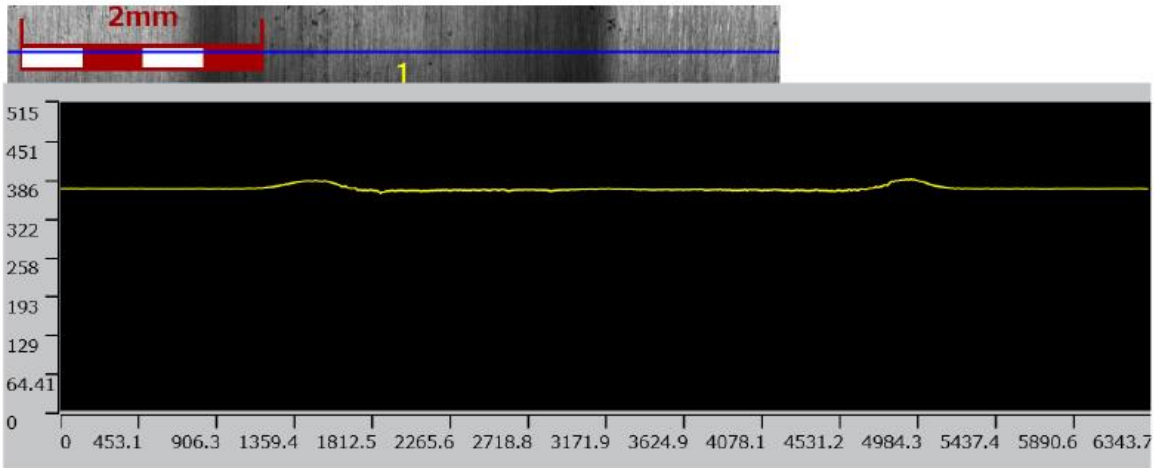


No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	λc [μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	5.060	3.688	8.748	0.000	23.528	2.560	800.000

No.	Result	Height[μm]	Radius[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	-	3332.811
<input checked="" type="checkbox"/>	2	495.109	-

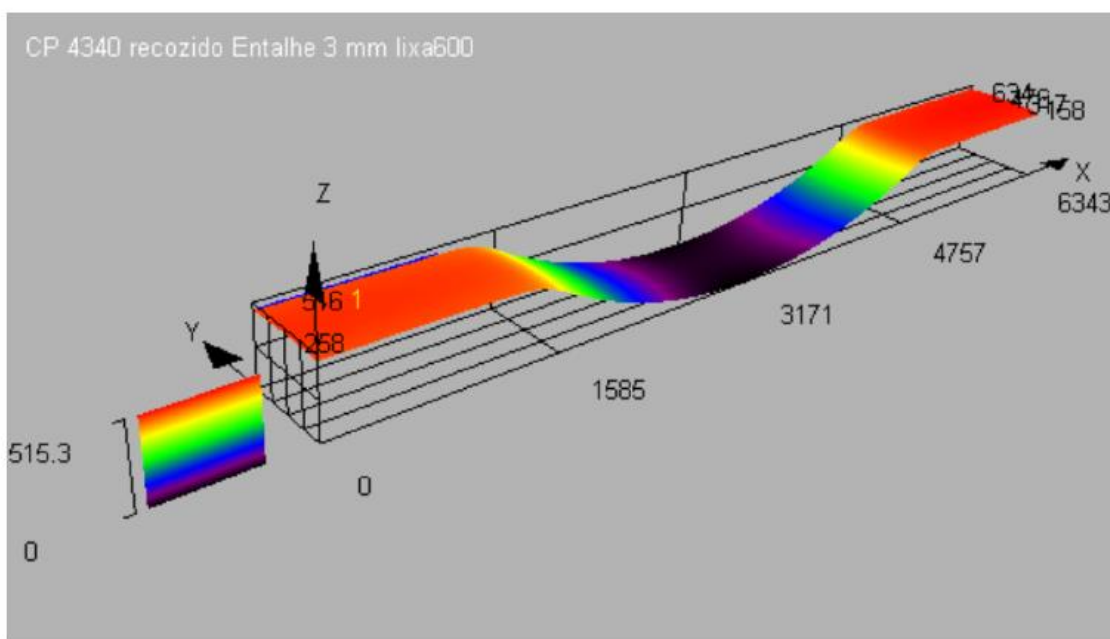


CP 4340 recozido entalhe 3mm lixa 600

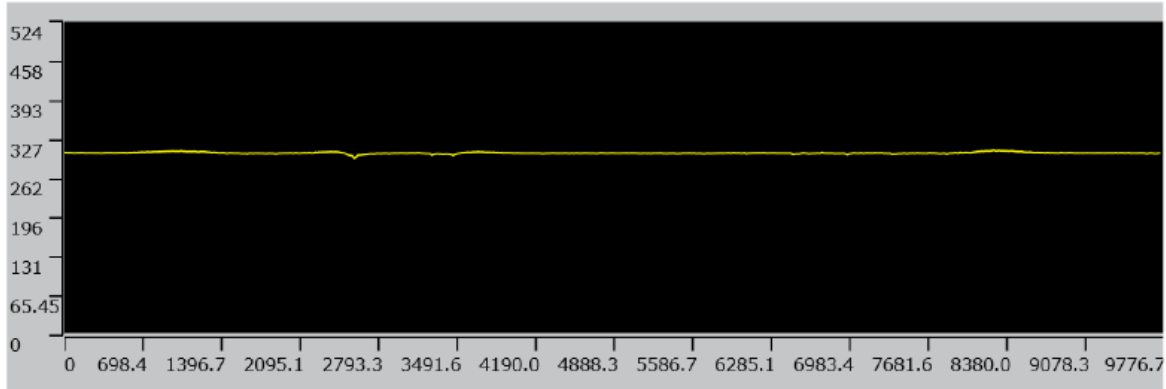


No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	7.023	3.976	10.999	0.000	24.957	2.834	800.000

No.	Result	Height[µm]	Radius[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	-	3014.263
<input checked="" type="checkbox"/>	2	496.010	-

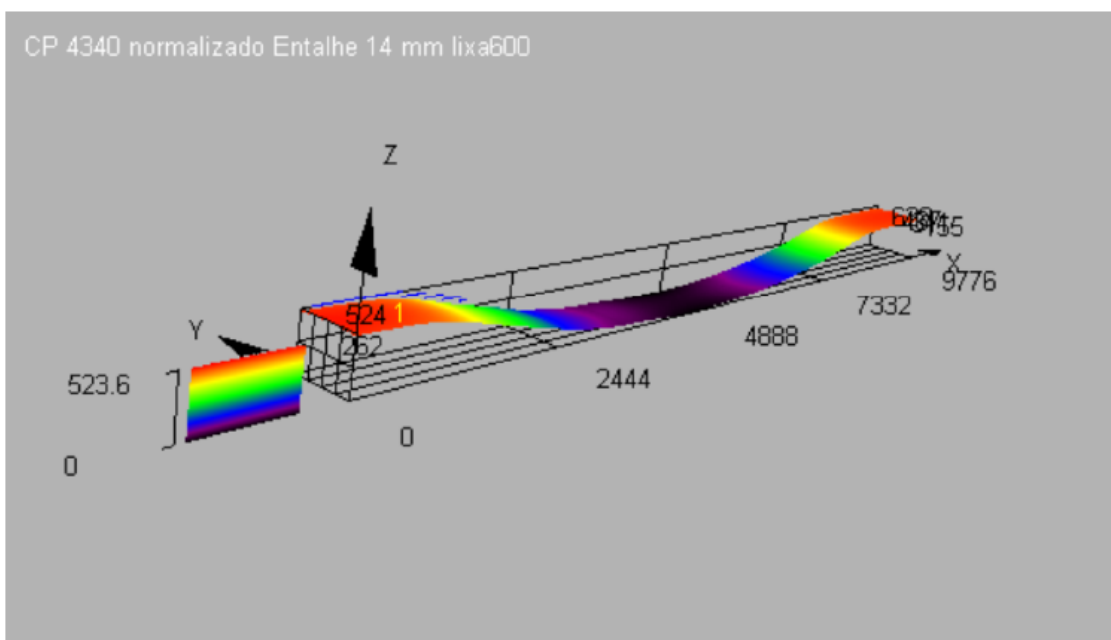


CP 4340 normalizado entalhe 14mm lixa 600

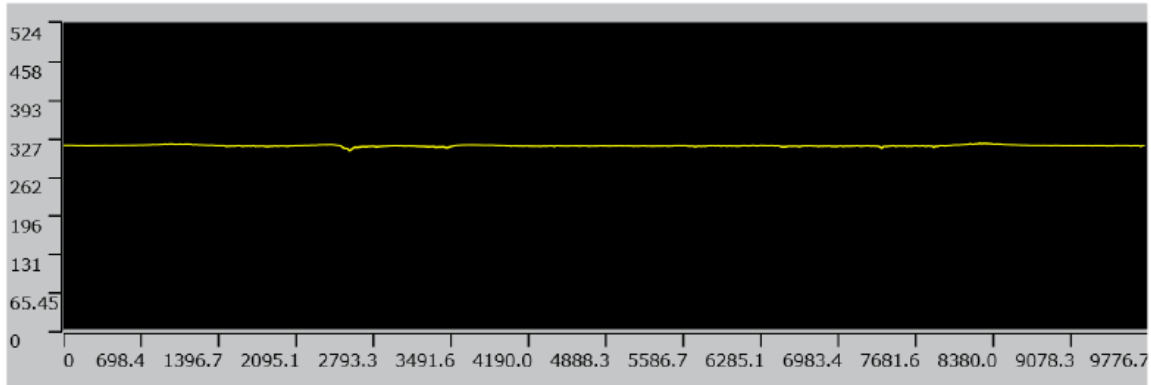
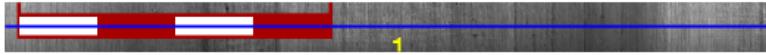


No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	λc [μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	2.353	2.706	5.060	0.932	13.823	0.939	800.000

No.	Result	Height[μm]	Radius[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	-	14015.088
<input checked="" type="checkbox"/>	2	491.031	-

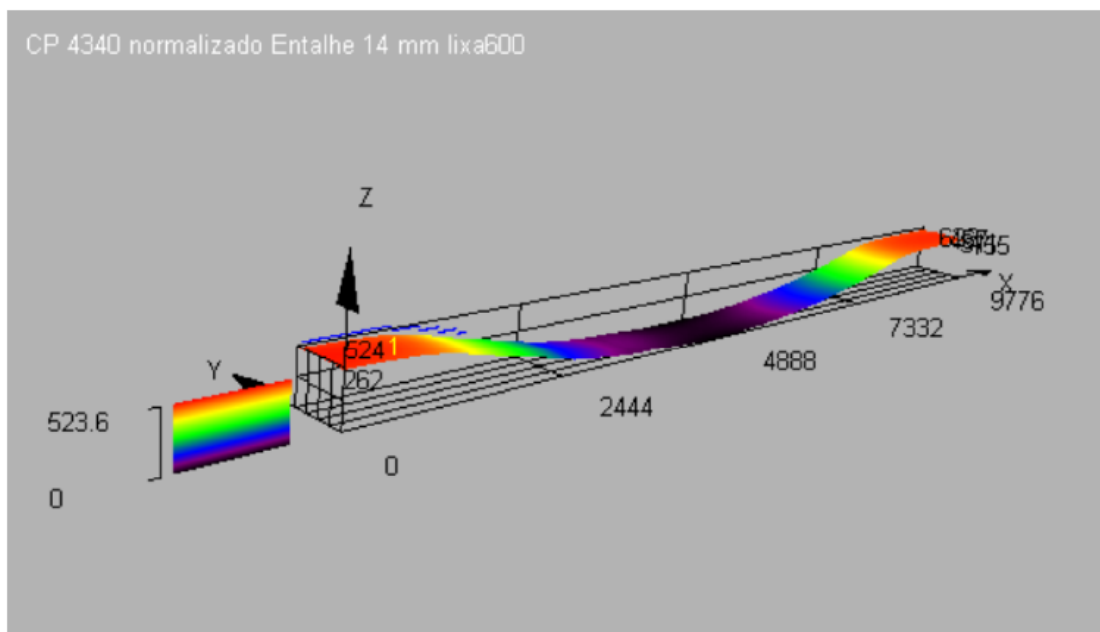


CP 4340 normalizado entalhe 14mm lixa 600

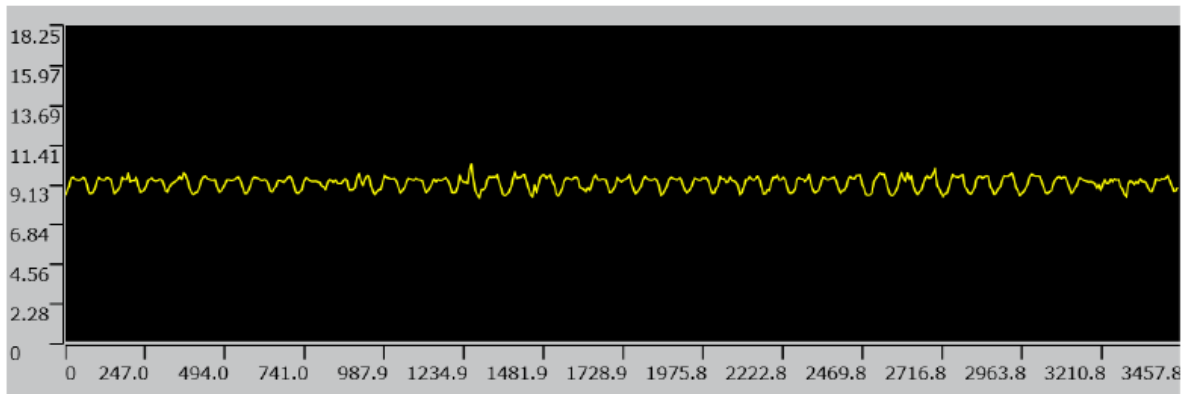


No.	Result	Rp[μm]	Rv[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	λc[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.835	2.576	4.411	0.087	13.236	0.921	800.000

No.	Result	Height[μm]	Radius[μm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1		14250.188
<input checked="" type="checkbox"/>	2	499.916	-

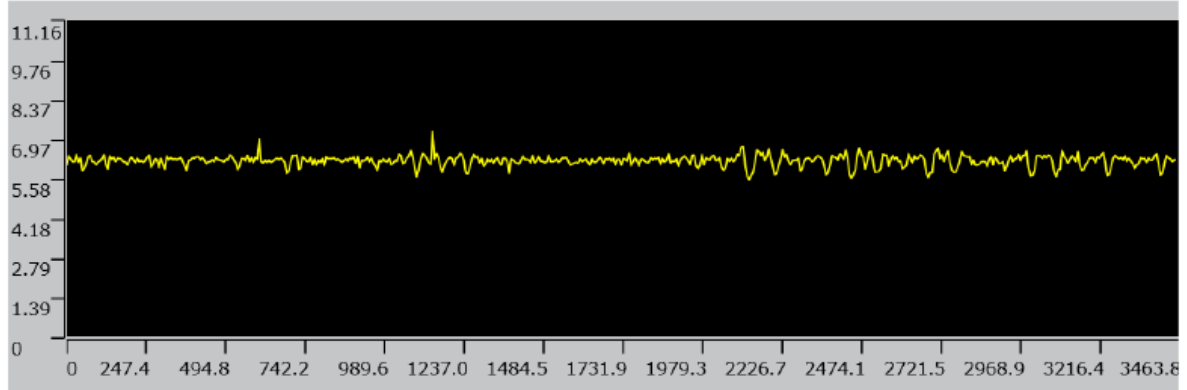


CP vazado inox 304L lixa 400



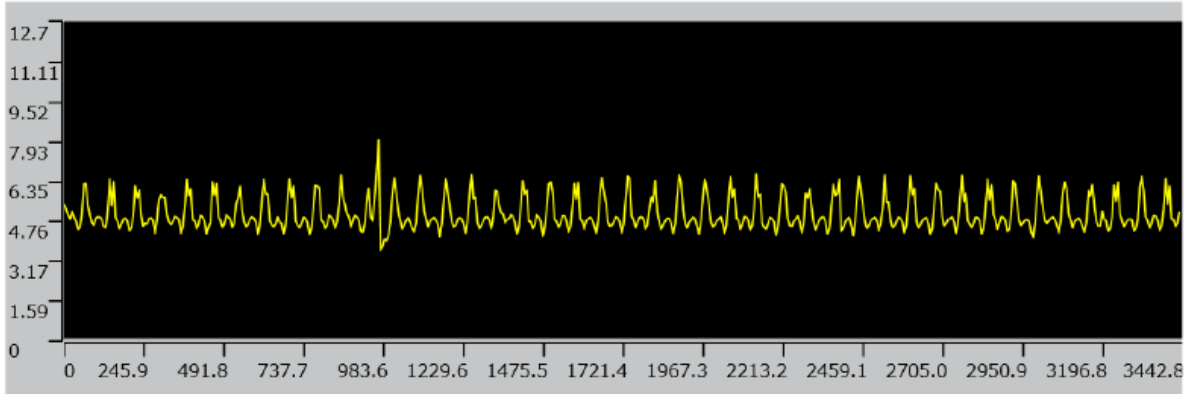
No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.653	0.690	1.342	0.223	3.944	0.314	80.000

CP vazado inox 304L lixa 600



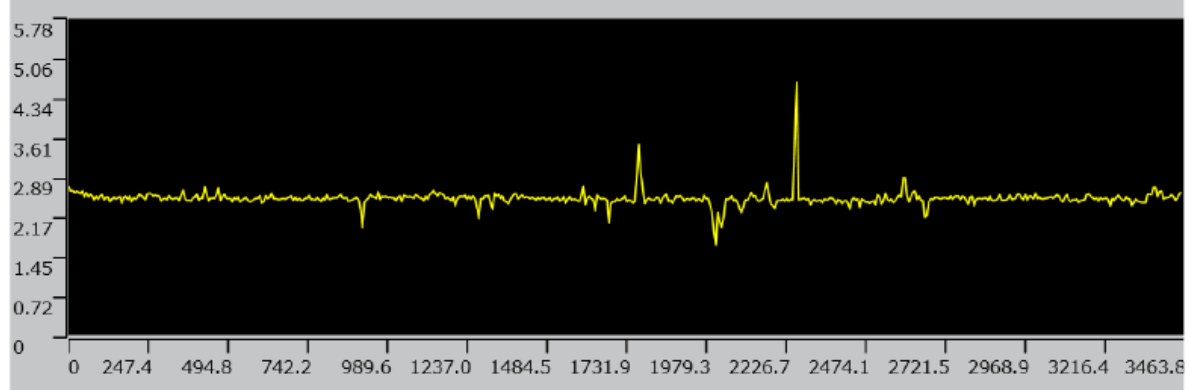
No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.376	0.484	0.859	0.473	1.919	0.141	80.000

CP vazado inox 304L lixa 400



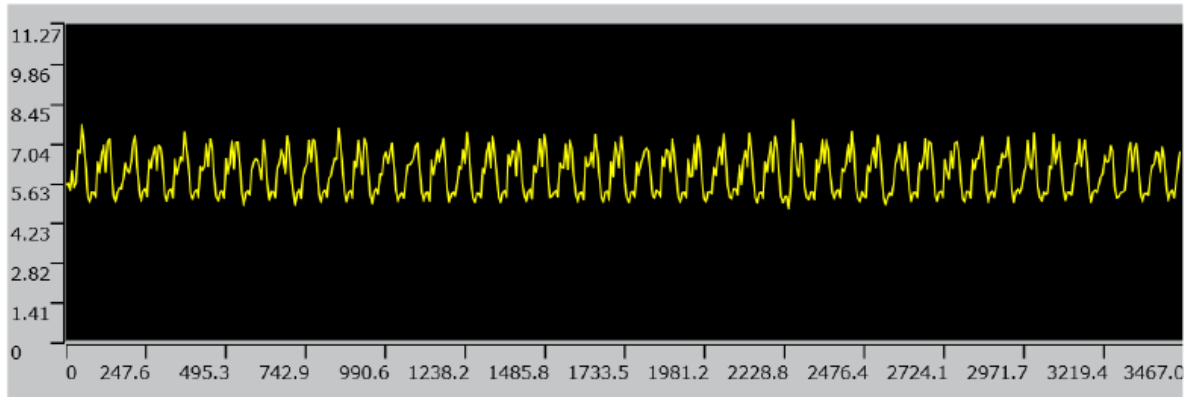
No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.561	0.860	2.421	0.377	4.611	0.501	80.000

CP vazado inox 304L lixa 600



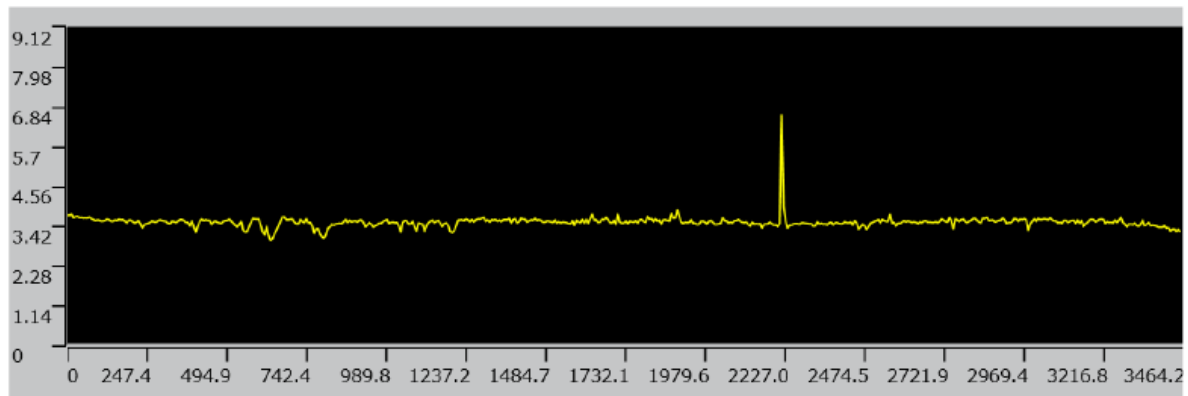
No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.026	1.108	2.134	0.858	5.410	0.162	800.000

CP vazado inox 304L lixa 400



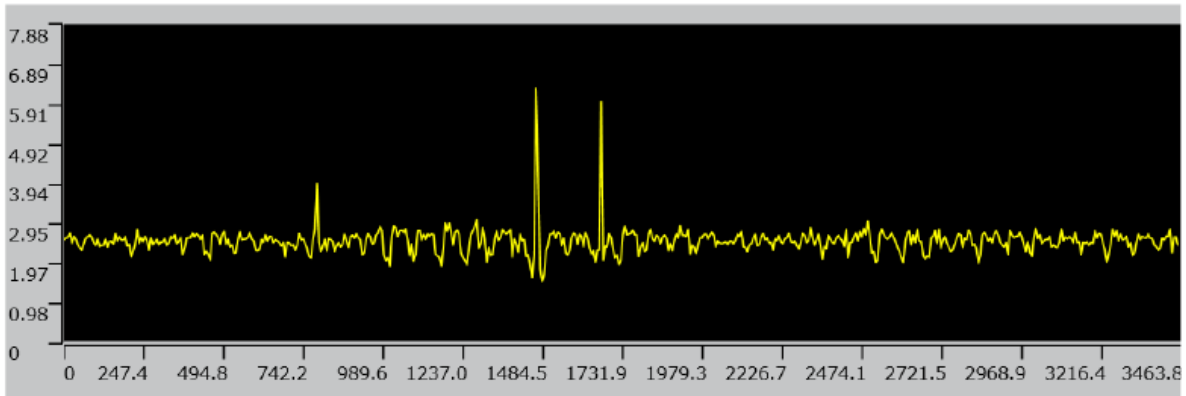
No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.394	1.076	2.469	0.662	3.511	0.640	80.000

CP vazado inox 304L lixa 600



No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.167	0.398	1.565	0.639	4.439	0.179	800.000

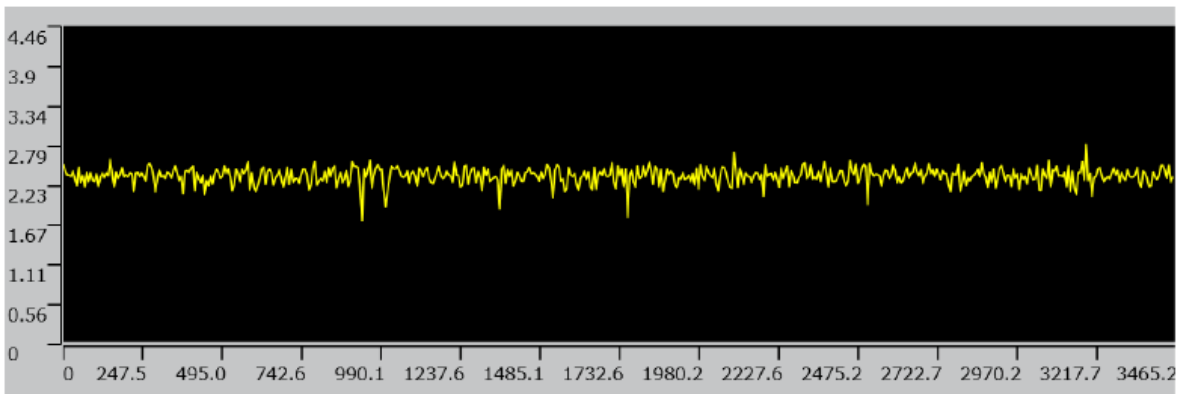
CP vazado inox 304L lixa 600



No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.604	0.539	1.143	0.707	5.495	0.181	80.000

ANEXO XXVIII: Conferência dimensional do CP vazado de aço inox 304L – 5 com lixa 600 durante o dobro do tempo

CP vazado inox 304L lixa 600 duas vezes



No.	Result	Rp[µm]	Rv[µm]	Rz[µm]	Rc[µm]	Rt[µm]	Ra[µm]	λc[µm]
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0.266	0.375	0.641	0.332	1.389	0.087	80.000