

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DOUGLAS LUIS MARQUES

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE DIFERENTES PARÂMETROS DE
USINAGEM SOBRE OS DESVIOS DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO
NO TORNEAMENTO DE UMA LIGA DE TITÂNIO**

SÃO CARLOS
2023

DOUGLAS LUIS MARQUES

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE DIFERENTES PARÂMETROS DE
USINAGEM SOBRE OS DESVIOS DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO
NO TORNEAMENTO DE UMA LIGA DE TITÂNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli

SÃO CARLOS
2023



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 28/2023/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

DOUGLAS LUIS MARQUES

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE DIFERENTES PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE OS DESVIOS DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO NO TORNEAMENTO DE UMA LIGA DE TITÂNIO

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 28 de julho de 2023

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Armando Ítalo Sette Antonialli
Membro da Banca 1	Fabricio Tadeu Paziani
Membro da Banca 2	Vitor Ramos Franco



Documento assinado eletronicamente por **Armando Ítalo Sette Antonialli, Docente**, em 28/07/2023, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Ramos Franco, Docente**, em 28/07/2023, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Tadeu Paziani, Docente**, em 28/07/2023, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1116607** e o código CRC **C3C2B202**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, que durante meu percurso de graduação deram todo o apoio que eu poderia precisar e a paciência que só pais poderiam ter. À minha noiva, pelo suporte inabalável desde quase o começo da graduação e por me levantar quando eu parecia estar caindo. À minha irmã e meu cunhado pela prestatividade e acolhimento sempre.

Agradeço aos meus amigos que não deixaram de estar presentes quando fosse preciso. Àqueles que fiz durante a graduação, sem os quais as seções de estudos não seriam as mesmas.

Agradeço ao professor Armando que, como orientador, sempre mostrou disposição pra me permitir melhorar meu trabalho. E aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica que me ajudaram a construir os blocos de conhecimento que me permitiram chegar aqui, assim como diversos professores de outros departamentos.

*“And be a simple kind of man
Oh, be something you love and understand”*

Simple Man - Lynyrd Skynyrd

RESUMO

Ligas de titânio são de grande importância como biomateriais em razão de sua elevada resistência à corrosão e biocompatibilidade. O titânio tem um módulo de elasticidade reduzido quando comparado a aços de resistência mecânica similar, além de baixa condutividade térmica relativa que dificulta a dissipação do calor, o que resulta em uma dinâmica complexa durante sua usinagem. A seleção dos parâmetros de processo deve ter tal comportamento em foco, já que ele afeta a integridade estrutural e a vida útil das ferramentas e pode precarizar a superfície usinada. O presente trabalho determinou a influência da variação da profundidade de usinagem axial, velocidade de corte e avanço sobre o desvio de circularidade e desvio dimensional na usinagem de peças de liga de titânio Ti-6Al-4V ELI através do método de Taguchi L9. Foi determinado que nenhuma das propriedades possuía uma variável significativa. No desvio dimensional, apesar da ausência de variável significativa, ficou claro o efeito da variação de cada parâmetro, os quais tendem a reduzir a diferença entre o diâmetro efetivo e o nominal conforme aumentam, com exceção da velocidade de corte. Para o desvio de circularidade, apesar de nenhuma variável significativa ser determinada, o método de Taguchi permitiu a visualização do efeito crescente sobre o desvio dos parâmetros de avanço e profundidade de usinagem, enquanto a velocidade de corte teve um efeito decrescente sobre a amplitude dos picos, vales e circularidade geral nas peças. Os valores mensurados de circularidade ficaram dentro dos limites esperados para o processo de torneamento, porém os desvios dimensionais ultrapassaram o esperado, ficando quase o dobro do que foi estabelecido como tolerância para o torneamento. A busca por variáveis significativas se mostrou inconclusiva porém foi possível observar como os valores diferentes dos parâmetros afetam o resultado final, permitindo escolher parâmetros de modo que melhor se ajustem aos resultados finais desejados.

Palavras-chave: Biomateriais. Tolerâncias dimensionais. Tolerâncias geométricas. Dinâmica de usinagem. Circularidade.

ABSTRACT

Titanium alloys are of great importance as biomaterials due to their high corrosion resistance and biocompatibility. Titanium has a low elasticity modulus when compared to steel alloys of similar mechanical resistance, furthermore it has a relatively low thermal conductivity that makes heat dissipation more difficult, which results in complex dynamics during its machining. The choice of machining parameters must have this behavior in focus, since it affects the tools' structural integrity and lifespan and may preclude the machined surface. The current work has determined the influence of varying axial depth of cut, cutting speed and feed rate on roundness deviation and dimensional deviation when machining 9 Ti-6Al-4V titanium alloy parts using the Taguchi L9 method. It was determined that none of the properties had any significant variable. For the dimensional deviation, despite the absence of a significant variable, it was clear the effect of the variation of each parameter, which tended to reduce the difference between the effective and the nominal diameter while they increased, with the exception of the cutting speed. For circularity deviation, although no significant variable was determined, Taguchi's method allowed the visualization of the increasing effect on deviation of the feed and depth of cut parameters, while cutting speed had a decreasing effect on the amplitude of peaks, valleys and overall circularity in the parts. The measured values of circularity kept inside the expected limits for the turning process, but the dimensional deviation went beyond what was expected, being nearly double the value that was established as tolerance for the turning process. The search for significant variables was shown to be inconclusive but it was possible to observe how the different values of the parameters affected the final result, allowing one to choose the parameters in a way that they fit better with the wished final results.

Keywords: Biomaterials. Dimensional tolerances. Geometric tolerances. Machining dynamics. Circularity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica da tolerância de circularidade	15
Figura 2 – Dimensões nominais dos corpos de prova	20
Figura 3 – Foto do corpo de prova com as seções numeradas	20
Figura 4 – Peça presa na placa de fixação do circularímetro Taylorond 131	21
Figura 5 – Peça na placa de fixação e ponta de contato	21
Figura 6 – Demonstração dos parâmetros RON_p , RON_v e RON_t	22
Figura 7 – Circularidade da peça 7, seção 7	23
Figura 8 – Circularidade da peça 7, seção 7 extraída por análise de imagem	23
Figura 9 – Dados filtrados da peça 7, seção 7	24
Figura 10 – Comparação da PSD de peça 7, seção 7, antes e depois do filtro aplicado	24
Figura 11 – Desvio dimensional em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).	25
Figura 12 – Altura do maior pico RON_p em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).	26
Figura 13 – Altura do maior vale RON_v em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).	27
Figura 14 – Circularidade total RON_t em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).	28
Figura 15 – Representação visual das SNs	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da liga Ti-6Al-4V	17
Tabela 2 – Comparação do módulo de elasticidade entre o titânio comercialmente puro, ligas de titânio e ossos	18
Tabela 3 – Parâmetros de corte dos corpos de prova	19
Tabela 4 – Análise de variância para o desvio dimensional	29
Tabela 5 – Tabela de influência para o desvio dimensional	30
Tabela 6 – Análise de variância para RON_p	30
Tabela 7 – Tabela de influência para RON_p	30
Tabela 8 – Análise de variância para RON_v	31
Tabela 9 – Tabela de influência para RON_v	31
Tabela 10 – Análise de variância para RON_t	31
Tabela 11 – Tabela de influência para RON_t	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
dB	Decibéis
DOF	<i>Degree of freedom</i> (Grau de liberdade)
IT	<i>International Tolerance</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i> (Densidade espectral de energia)
RON	<i>Roundness</i> (Circularidade)
SN	<i>Signal-noise ratio</i> (Razão de sinal-ruído)
SS	<i>Square sum</i> (Soma dos quadrados)
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 – Introdução	12
2 – Objetivos	14
2.1 Objetivos específicos	14
3 – Fundamentação teórica	15
3.1 Desvio dimensional, tolerância geométrica e circularidade	15
3.2 Titânio como biomaterial	16
4 – Metodologia	19
4.1 Medição do desvio dimensional e da circularidade	19
4.2 Filtragem dos dados	22
5 – Resultados	25
5.1 Desvio dimensional	28
5.2 Circularidade, picos e vales	29
5.3 Análise de variância	29
5.4 Comparação com tolerância dimensional e limites de circularidade	33
6 – Considerações finais	34
REFERÊNCIAS	36
Apêndices	38
APÊNDICE A – Código em python utilizado para processamento dos dados	39

1 INTRODUÇÃO

Na área biomédica, o titânio e suas ligas são algumas das principais escolhas como materiais para a produção de implantes. A sua biocompatibilidade é maior do que as das outras ligas metálicas mais usadas como biomateriais muito em razão de sua resistência à corrosão (ELIAS et al., 2008). As ligas β de titânio de grau médico, em especial, foram desenvolvidas com a melhora da biocompatibilidade em mente (SITI NUR HAZWANI et al., 2022).

A usinagem pode ser severamente afetada por deformações elásticas do sistema peça-ferramenta-máquina e expansão térmica do material (MAYER; PHAN; CLOUTIER, 2000). Estes trazem movimentos relativos imprevistos entre a peça e a ferramenta, gerando assim erros dimensionais e geométricos. Os erros dimensionais são definidos como a diferença entre a dimensão nominal e a dimensão final efetiva, podendo ela ser de qualquer tipo. Em um torneamento convencional, os erros dimensionais mais comuns são os de diâmetro ou os de comprimento, no caso de faceamento. Os desvios geométricos são desvios de forma, orientação e posição, caracterizado pela diferença entre uma geometria de peça desejada e a obtida. Estes podem ser definidos com diversos tipos diferentes que acolhem diferentes necessidades de formatos diferentes, porém os mais comuns em torneamento são os de circularidade, cilindridade e concentricidade. Estes erros dimensionais e geométricos, apesar de serem notados juntos por muitas vezes, não são necessariamente indicação da existência do outro.

As deformações elásticas podem ser, essencialmente, relacionadas com as forças de corte durante a usinagem (MAYER; PHAN; CLOUTIER, 2000). Assim, métodos que reduzam essas forças são um ponto de partida para o controle desses erros que podem ser prejudiciais à peça. Hu et al. (2019) e Brehl e Dow (2008) apresentaram a usinagem assistida por vibração como um método viável para isto, tornando a interface de contato peça-ferramenta intermitente e efetivamente reduzindo as forças de corte, trazendo benefícios para a qualidade final da peça que vão além da precisão dimensional e baixo desvio geométrico. Foi também notado que a efetividade do método pelo autor descrito dependia muito da velocidade de corte.

Jianliang e Rongdi (2006) estudaram o efeito de parâmetros de corte em uma barra esbelta torneada com sustentação intermediária. Manikandan e Bera (2021) estudaram o efeito dos parâmetros durante a usinagem de peças cilíndricas de paredes finas. Tais trabalhos mostraram que o controle de parâmetros se definiu como uma das formas de influenciar a qualidade final da peça, de modo que muitas vezes não são ainda inteiramente compreendidos, trazendo à tona a necessidade de estabelecer relações entre parâmetros de corte e propriedades finais da peça para serem obtidas peças com a forma e dimensões o mais próximas das nominais possíveis e evitar retrabalhos ou perdas.

As propriedades do titânio fazem com que seja um material considerado difícil de usar. A baixa condutividade térmica, cerca de sete vezes menor do que a do aço, significa dificuldade de dissipação de calor de modo que a maior parcela do calor seja dissipado através da ferramenta,

resultando em uma temperatura de corte particularmente alta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). O módulo de elasticidade, baixo se comparado a materiais de resistência mecânica similar, causa *chatter*, ou vibração autoexcitada, durante o corte. Como resultado, a usinagem do titânio é um processo de custo elevado (SUN; BRANDT; DARGUSCH, 2009). Diniz, Marcondes e Coppini (2013) descrevem este efeito como resultado da deformação elástica na vizinhança da ferramenta em um exemplo baseado no processo de fresamento. Após uma aresta de corte causar esta deformação elástica, a próxima aresta irá cortar a espessura nominal de corte somada ao volume do material deformado sobre o qual não foi concluída a recuperação elástica. Desta maneira, o titânio se torna suscetível aos desvios previamente mencionados, tornando este um objeto de estudo para se obter peças apropriadas para uso biomédico.

Nas próximas páginas, os objetivos trarão a visão geral do que este trabalho busca alcançar e como será alcançado. A fundamentação trará a explicação de alguns conceitos necessários para o trabalho, além de contextualização de outros trabalhos relacionados, enquanto a metodologia explicitará os passos que serão usados para obter, filtrar, tratar e apresentar os dados de estudo. Os resultados, por fim, trarão as observações e conclusões que a análise dos dados obtidos trarão.

2 OBJETIVOS

A variação de diferentes parâmetros de usinagem aplicados à produção de peças resultam em diferentes propriedades, desde o tempo e custo do processo até a microestrutura da superfície da peça. Este trabalho busca correlacionar quantitativamente a velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem com os desvios diametral e de circularidade produzidos no torneamento cilíndrico externo da liga Ti-6Al-4V ELI, comparando a significância estatística e a variação com os valores tomados da geometria efetiva.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, podem-se destacar:

- Monitorar os desvios dimensional e geométrico empregando instrumentos manual e automatizado.
- Proceder com a análise de variância para o estudo quantitativo dos resultados obtidos

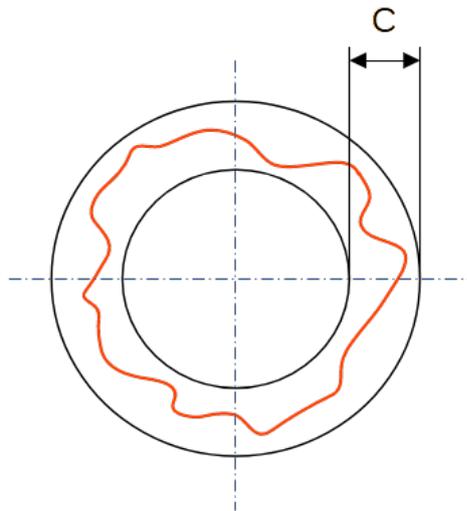
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta conhecimentos fundamentais para o trabalho.

3.1 DESVIO DIMENSIONAL, TOLERÂNCIA GEOMÉTRICA E CIRCULARIDADE

A circularidade é um desvio macrogeométrico que utiliza a diferença entre o diâmetro de dois círculos concêntricos, dentro dos quais deve estar o perfil real. O perfil cujo pico ou vale ultrapassar estes círculos é considerado não conforme (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2020). A circularidade é um refinamento da tolerância dimensional e deve ser menor do que esta (COGORNO, 2006). É mostrada na Figura 1 uma representação gráfica de um perfil exagerado de uma peça, em vermelho, entre dois círculos concêntricos. A diferença entre os diâmetros, denominada C , é a tolerância de circularidade.

Figura 1 – Representação gráfica da tolerância de circularidade



Fonte: Autor

Para determinar o desvio de circularidade de uma seção, deve ser utilizado um relógio comparador em todo o perímetro de uma seção da peça apoiada em um dispositivo que permita eliminar a influência de outros erros de forma, como um prisma em V de dimensão adequada ou um dispositivo de medição entre centros (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2020). Caso o medidor não esteja ortogonal ao eixo da peça, por exemplo, a seção medida poderia se tornar ovalizada e a retilidade da superfície poderia influenciar no resultado.

Ainda para a medição da circularidade, pode ser usado um circularímetro conectado a um computador, com o qual a medida pode ser obtida de forma rápida e cujos resultados são mais abrangentes do que a inspeção visual. Adicionalmente, tal sistema pode ser utilizado para medir outros desvios geométricos, como o batimento e a retilidade (COGORNO, 2006).

Em condições de produção, pode-se tomar os seguintes valores para a tolerância de circularidade: até 0,01 mm para torneamento, 0,01 mm até 0,015 mm para mandrilamento e 0,005 mm a 0,015 mm para retificação (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2020).

O desvio dimensional é a diferença entre uma dimensão nominal predeterminada durante o projeto de um item e a dimensão efetiva após o processo de fabricação. Especificamente para este trabalho, o desvio dimensional será a diferença entre o diâmetro nominal da peça e o diâmetro efetivo. O desvio dimensional d_d é calculado conforme descrito na Equação (1).

$$d_d = \varnothing_i - a_p - \varnothing_e \quad (1)$$

onde \varnothing_i é o diâmetro inicial da peça antes da usinagem, a_p é a profundidade de usinagem e \varnothing_e é o diâmetro efetivo.

Mayer, Phan e Cloutier (2000) fazem uma análise das forças em um sistema máquina-ferramenta-peça durante torneamento e as deformações elásticas resultantes afim de desenvolver um modelo numérico para prever erros dimensionais no processo. A análise permitiu um entendimento mais profundo sobre a formação do erro em si. Asao et al. (1992) desenvolveram uma função preditiva para corrigir erros de usinagem conforme ocorrem, limitando o erro dimensional observado após a usinagem de 18 μm para 2 μm .

Jianliang e Rongdi (2006) estudaram o erro dimensional de barras esbeltas de comprimento grande torneadas. Foi determinado que a profundidade de usinagem e o avanço foram os parâmetros que mais influenciavam o erro, sendo que a velocidade de corte teve pouca influência. Segundo o autor, a energia específica de corte é independente da velocidade de corte sobre uma grande variedade de valores. Saravanakumar et al. (2018), por outro lado, determinaram que o avanço era o parâmetro que mais influenciou na usinagem de liga de alumínio em torno CNC, seguido pela velocidade de corte, enquanto a profundidade de usinagem teve efeito pouco visível. Samsudeensadham et al. (2020) estudaram o efeito dos parâmetros sobre uma liga de titânio Ti-6Al-4V após um processo de furação, dando atenção para as dimensões, circularidade e rugosidade superficial. Foi determinado que a velocidade de corte tinha a maior influência sobre estas propriedades.

3.2 TITÂNIO COMO BIOMATERIAL

Um material deve conter um conjunto de propriedades específicas para poder ser considerado para uso na biomedicina. Entre estas propriedades, estão a densidade, que deve ser parecida com a dos ossos, resistência mecânica significativa, resistência à fadiga, módulo de elasticidade baixo e similar ao dos ossos, resistência ao desgaste e boa biocompatibilidade. Entretanto, não é simples combinar todas estas propriedades em um único material (OLDANI; DOMINGUEZ, 2012). Adicionalmente, devido aos fluidos do corpo humano, resistência à corrosão também é uma propriedade determinante de biomateriais (BREME; EISENBARTH; BIEHL, 2003).

Alguns metais e ligas metálicas são usados como biomateriais devido às suas propriedades mecânicas e compatibilidade decente, mas têm como uma desvantagem em geral a falta de resistência a corrosão (OLDANI; DOMINGUEZ, 2012). Deste modo, titânio e ligas de titânio passaram a ser amplamente adotados como biomateriais devido à sua alta resistência a corrosão, combinada com o baixo módulo de elasticidade e biocompatibilidade considerada superior (LONG; RACK, 1996).

O uso de ligas de titânio como implantes cirúrgicos teve início na década de 1960, poucos anos depois de serem desenvolvidas para a indústria aeronáutica. O titânio comercialmente puro e a liga Ti64 (Ti-6Al-4V) são os mais comumente usados atualmente em aplicações biomédicas (KAUR; SINGH, 2019). Entretanto, o vanádio presente na liga apresenta toxicidade e possibilidade de dano a órgãos vitais, como a necrose das células dos músculos cardíacos, distúrbios gastrointestinais. O vanádio é também o mais tóxico para células pulmonares entre vários metais. O alumínio também é um metal reconhecidamente tóxico, podendo causar distúrbios neurodegenerativos (GOMES et al., 2011). Além disso, a liga Ti64 foi associada com reações alérgicas do corpo humano. Portanto foram investigados outros elementos para compor as ligas de titânio, com foco em elementos estabilizantes β . Em especial, as ligas Ti-6Al-7Nb e Ti-5Al-2,5Fe são consideradas metalurgicamente similares à Ti64 (CHEN; THOUAS, 2015).

Na Tabela 1 estão descritas as propriedades da liga Ti-6Al-4V, de acordo com a ASTM *International* (*American Society for Testing and Materials*).

Tabela 1 – Propriedades da liga Ti-6Al-4V

Diâmetro nominal [mm]	Tensão de ruptura min., [MPa]	Tensão de escoamento min., [MPa]	Enlongação em 4D min., [%]	Redução de área, [%]
Menor do que 4,75	860	795	10	-
4,75 até 44,45	860	795	10	25
44,45 até 63,50	825	760	8	20
63,50 até 101,60	825	760	8	12

Fonte: Adaptado de ASTM (2009).

Na Tabela 2, é mostrada a comparação dos módulos de elasticidades do titânio puro, da liga Ti-6Al-4V e dos ossos. Apesar do módulo de elasticidade ser considerado bom entre os possíveis biomateriais, a diferença entre os ossos e o titânio é grande.

Tabela 2 – Comparação do módulo de elasticidade entre o titânio comercialmente puro, ligas de titânio e ossos

Material	Módulo de Young [GPa]
Osso trabecular	0,01-1,57
Osso cortical	5-23
Titânio comercialmente puro	115
Ti-6Al-4V (recozido)	110-114
Ti-6Al-7Nb	105

Fonte: Adaptado de SITI NUR HAZWANI et al. (2022).

4 METODOLOGIA

As peças de liga de titânio Ti-6Al-4V foram usinadas previamente em um torno convencional, enquanto a vibração no sistema era registrada para o desenvolvimento do estudo feito por Pereira (2022). As peças foram colocadas em uma placa de fixação com um contraponto no lado oposto da peça. Cada peça tinha parâmetros de corte diferentes, sendo três diferentes profundidades de usinagem (a_p), três avanços (f) e três velocidades de corte (v_c). No total, foram feitas nove peças de modo que nenhuma delas compartilhava o mesmo conjunto de parâmetros, utilizando uma matriz ortogonal L9 e o método de Taguchi (PEREIRA, 2022). São apresentadas, na Tabela 3, os parâmetros utilizados para cada corpo de prova.

Tabela 3 – Parâmetros de corte dos corpos de prova

Corpo	v_c [m/min]	f [mm]	a_p [mm]
1	30	0,10	0,2
2	30	0,15	0,4
3	30	0,20	0,8
4	60	0,10	0,4
5	60	0,15	0,8
6	60	0,20	0,2
7	90	0,10	0,8
8	90	0,15	0,2
9	90	0,20	0,4

Fonte: Adaptado de Pereira (2022).

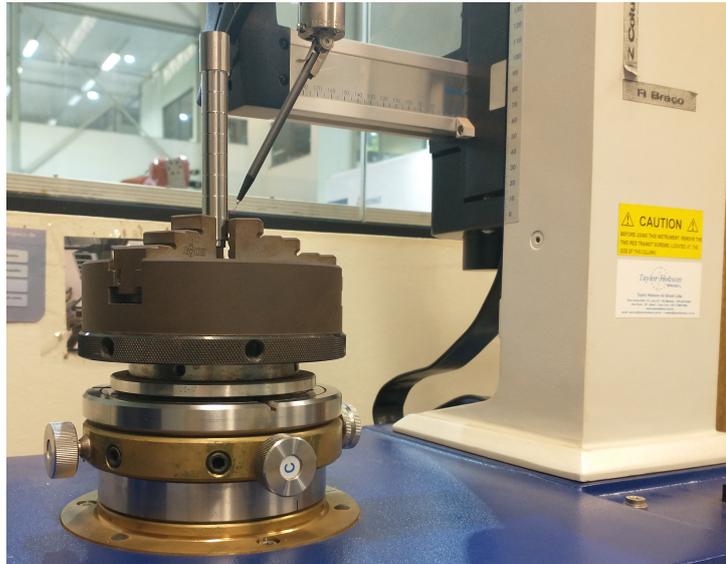
4.1 MEDIÇÃO DO DESVIO DIMENSIONAL E DA CIRCULARIDADE

Foram feitos 7 sulcos em cada um dos corpos de prova para dividi-lo em 8 seções, totalizando 72 seções com todas as peças. As medições de diâmetro foram feitas em cada seção, enquanto as medições de circularidade foram feitas em 7 das 8 seções de cada peça, sendo que a oitava foi utilizada para fixação. São mostradas na Figura 2 as dimensões de cada peça. A dimensão marcada como A na figura varia de acordo com a profundidade de usinagem utilizada, conforme a Tabela 3. É mostrada na Figura 3 um dos corpos de prova utilizados, assim como a numeração de cada seção da peça.

O diâmetro de cada seção foi medido através de um micrômetro em triplica, cuja média foi posteriormente comparada com o diâmetro nominal da peça caracterizado pela subtração da profundidade de usinagem no diâmetro inicial do corpo de prova antes da usinagem, o qual é de 14 mm para todas as peças (PEREIRA, 2022).

As circularidades dos corpos de prova foram mensurados automaticamente pelo circularímetro Taylor Hobson Taylorond 131, então presente no Núcleo de Manufatura Avançada

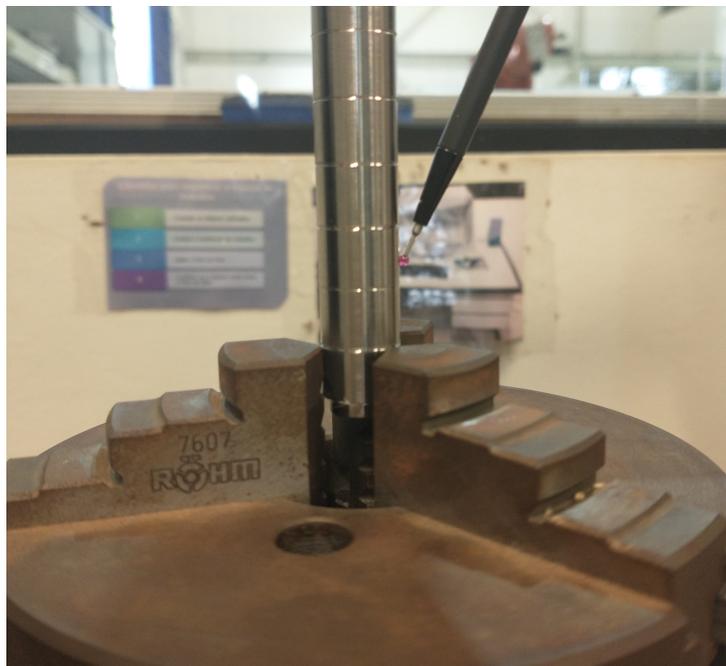
Figura 4 – Peça presa na placa de fixação do circularímetro Taylorond 131



Fonte: Autor

É possível ver mais claramente na Figura 5 a fixação da peça na placa. Adicionalmente, é também observável a ponta de contato da haste de aquisição de dados, feita de rubi.

Figura 5 – Peça na placa de fixação e ponta de contato

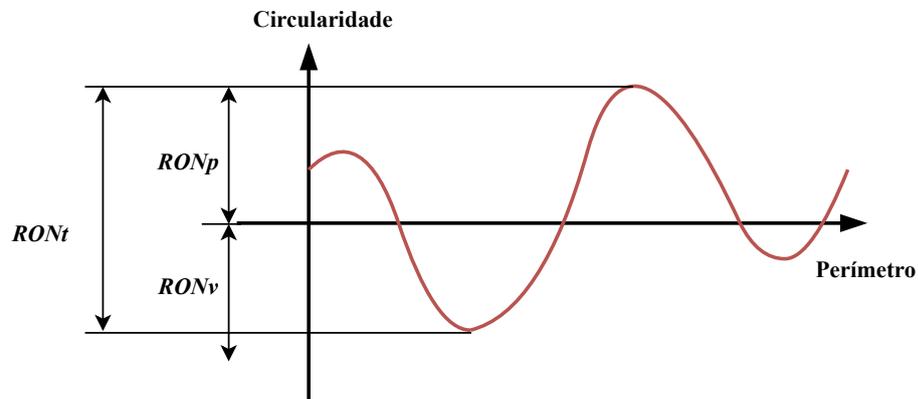


Fonte: Autor

Como saída, é disponibilizado pelo *software* do equipamento um gráfico junto a uma tabela com alguns resultados da medição. Dentre eles, os relevantes são o RON_v , que é o valor absoluto da altura do vale mais profundo da superfície medida, o RON_p , que é a altura da pico mais alto da superfície e o RON_t , que é a diferença de altura entre o pico mais alto e o vale mais

profundo. É exemplificado na Figura 6 uma curva de circularidade em um perímetro, similar aos emitidos para os corpos de prova, na qual os parâmetros descritos estão representados.

Figura 6 – Demonstração dos parâmetros RON_p , RON_v e RON_t



Fonte: Autor

A análise dos dados obtidos nas leituras mostrou um padrão de vales e picos prominentes que era notável em grande parte das leituras em localização semelhante. O padrão foi considerado um erro de posição generalizado nas peças, tendo em vista que as peças eram colocadas na máquina com sua posição angular indeterminada, eliminando a possibilidade de ser um erro de fabricação em todas as peças; tal erro levaria ao padrão ser observado em locais aleatórios do gráfico.

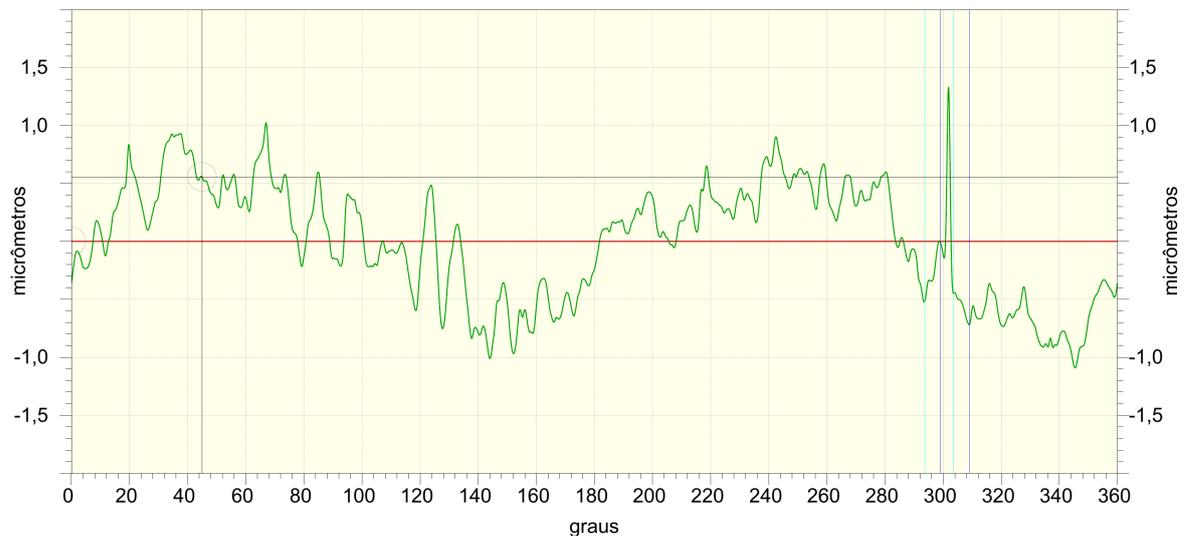
4.2 FILTRAGEM DOS DADOS

Os dados foram extraídos do *software* do medidor de circularidade como arquivos PDF compostos por um gráfico linear mostrando a característica da circularidade e dados pré-calculados em formato de tabela, sem incluir os dados brutos.

Para eliminar o erro de posicionamento notado e obter dados mais significantes, um filtro se fez necessário. Porém, sem os dados brutos disponíveis, foi necessária a obtenção dos dados através de análise de imagem: as curvas que caracterizam a circularidade de cada seção tem coloração verde, enquanto o restante dos gráficos eram compostos por preto, branco e tons de cinza variados. Assim, foram coletadas as posições de todos os pixels verdes de qualquer entonação. As posições de cada pixel foram depois relativadas com o pico mais alto e o vale mais profundo de cada medição. É mostrada na Figura 7 a circularidade como exportada pela máquina de medição de uma seção de exemplo, e na Figura 8 o resultado da extração dos dados através de reconhecimento de imagem.

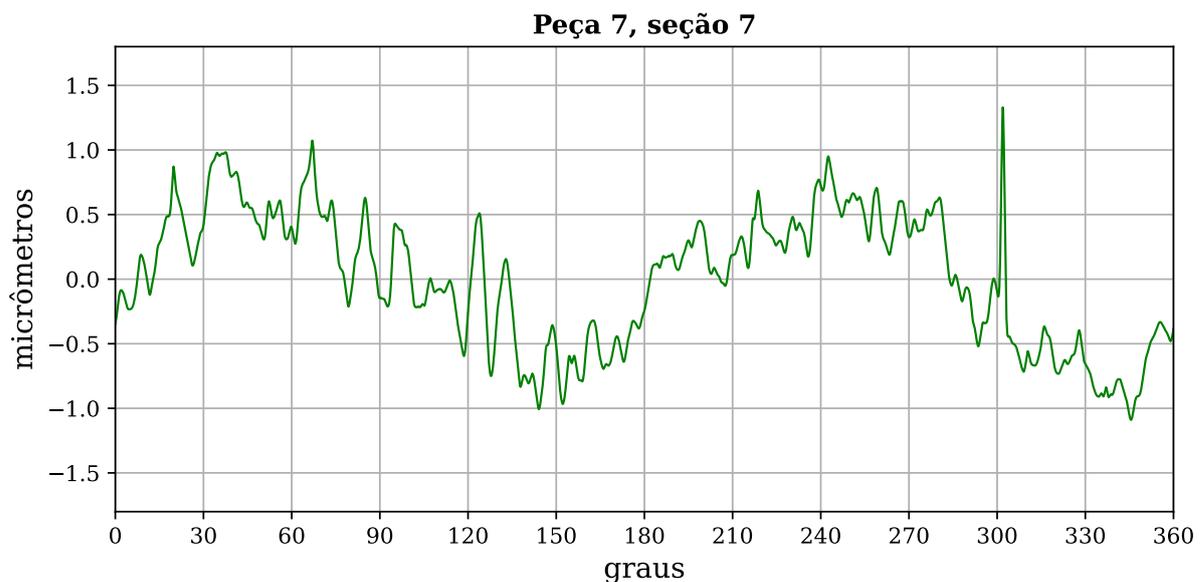
Com os dados brutos emulados obtidos, foram aplicadas *PSDs* em cada conjunto de dados, para obter em cada a frequência de maior amplitude que condiz com padrão ondulação de baixa frequência citados anteriormente como resultado de erros de posicionamento da peça. Em todos os gráficos obtidos em que o padrão era notado, era também visível que o padrão

Figura 7 – Circularidade da peça 7, seção 7



Fonte: Medidor de circularidade Taylor Hobson Taylorond 131

Figura 8 – Circularidade da peça 7, seção 7 extraída por análise de imagem

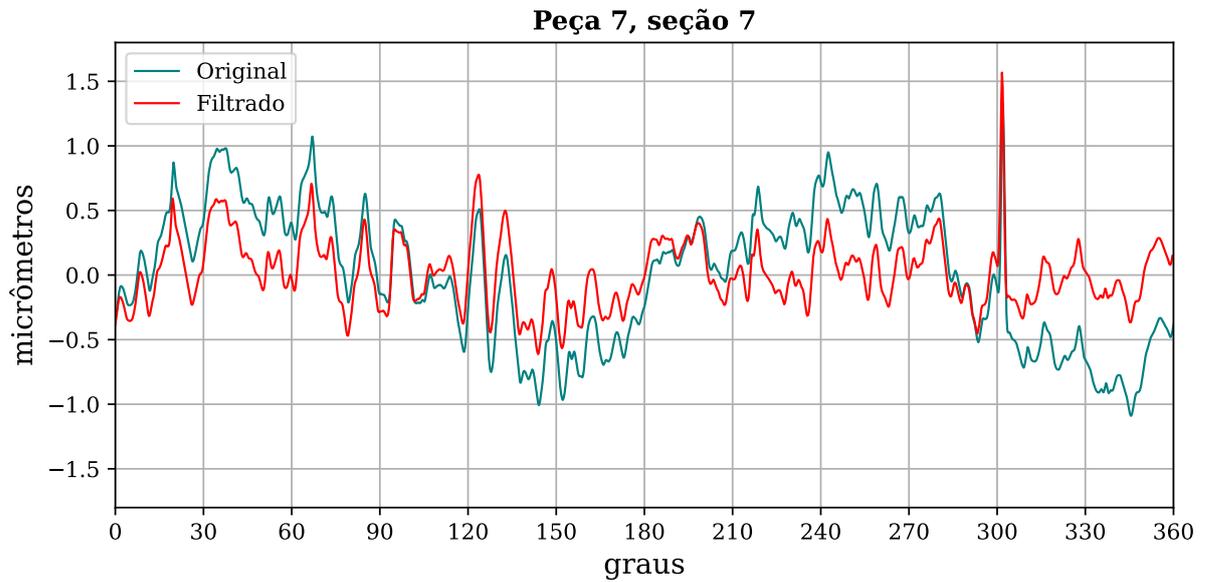


Fonte: Autor

tinha a maior amplitude quando comparado ao restante do perfil obtido. Tais frequências foram então eliminadas através de um filtro *Butterworth* passa-alta aplicado em *python*. É mostrado na Figura 9 um exemplo de comparação de dados filtrados com os dados originais. Alguns dos conjuntos de dados apresentaram perda de informação significativa com a filtragem em troca por pouca melhora nos picos e vales induzidos por erro de posicionamento, portanto os conjuntos de dados nos quais a filtragem foi mantida foram selecionados manualmente.

Com finalidade de comparação, são mostrados na Figura 10 a PSD obtida para a peça 7,

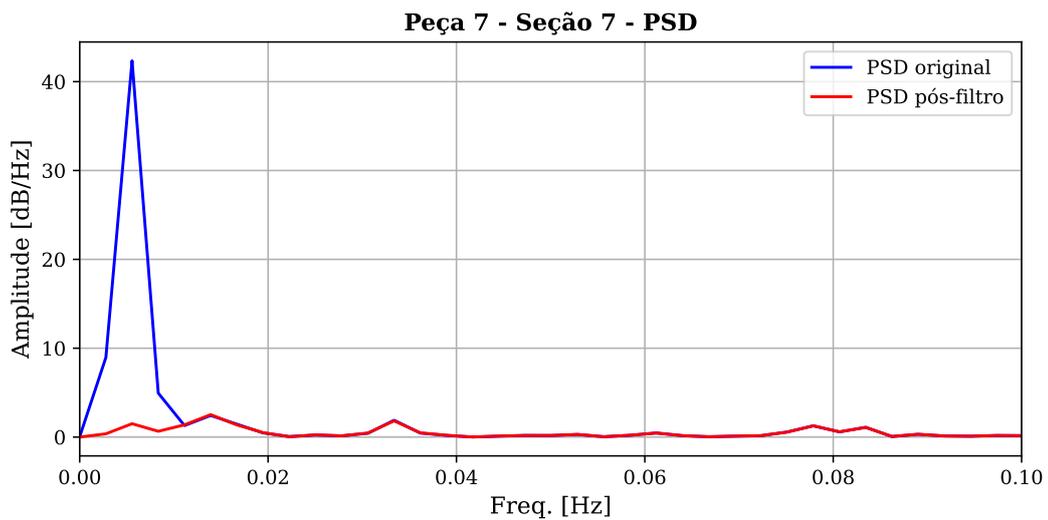
Figura 9 – Dados filtrados da peça 7, seção 7



Fonte: Autor

seção 7, antes e depois do filtro ser aplicado. Como é possível ser visto, a frequência de pico foi eliminada da PSD. É importante salientar que não há dados com relevância além do limite superior de frequência mostrado na figura.

Figura 10 – Comparação da PSD de peça 7, seção 7, antes e depois do filtro aplicado

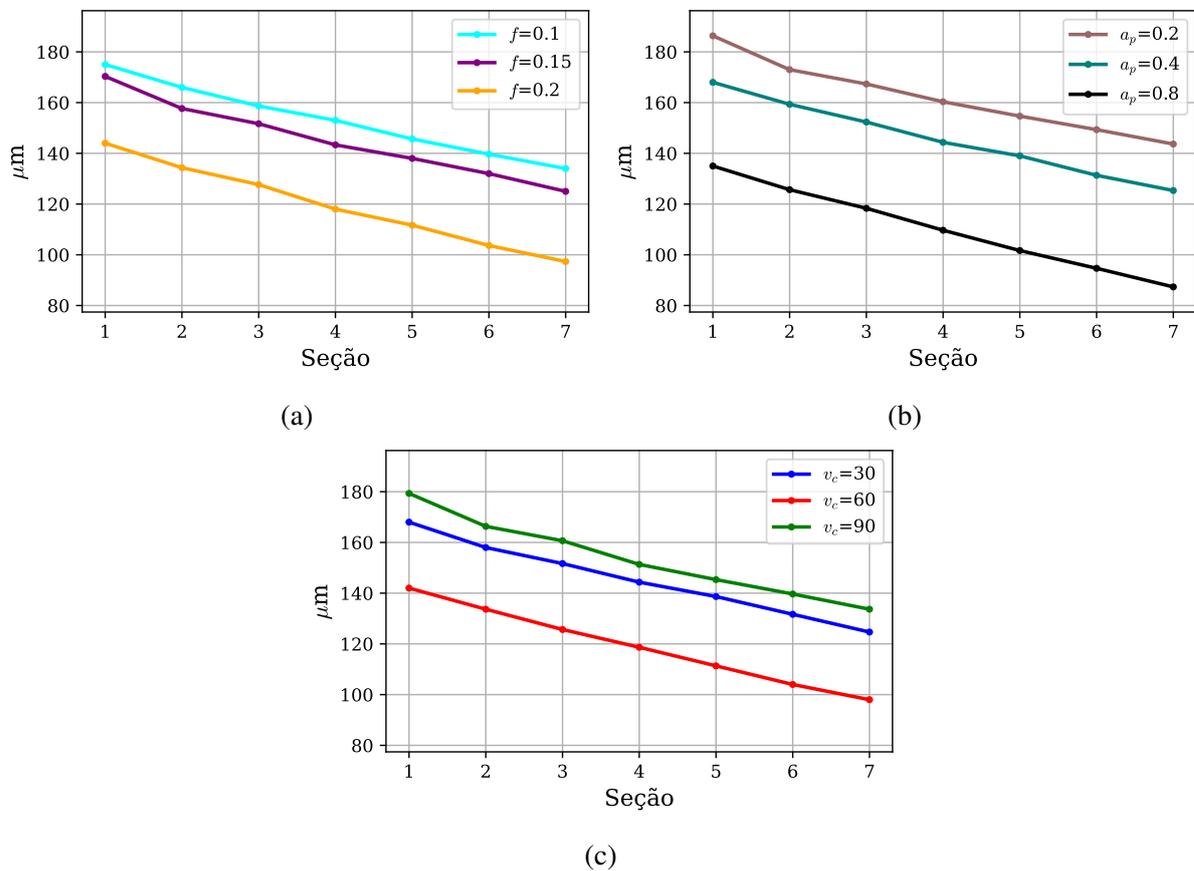


Fonte: Autor

5 RESULTADOS

As propriedades obtidas através da análise dos dados filtrados foram comparadas com os parâmetros de usinagem descritos na Tabela 3. Cada parâmetro tem três valores distintos, sendo que cada valor foi utilizado em três corpos de prova diferentes. Foram então tomadas as médias aritméticas das propriedades dos três corpos de prova que utilizavam o mesmo parâmetro. Assim, as médias das propriedades foram visualmente comparadas aos valores de parâmetros de corte: as médias do desvio dimensional são mostradas na Figura 11.

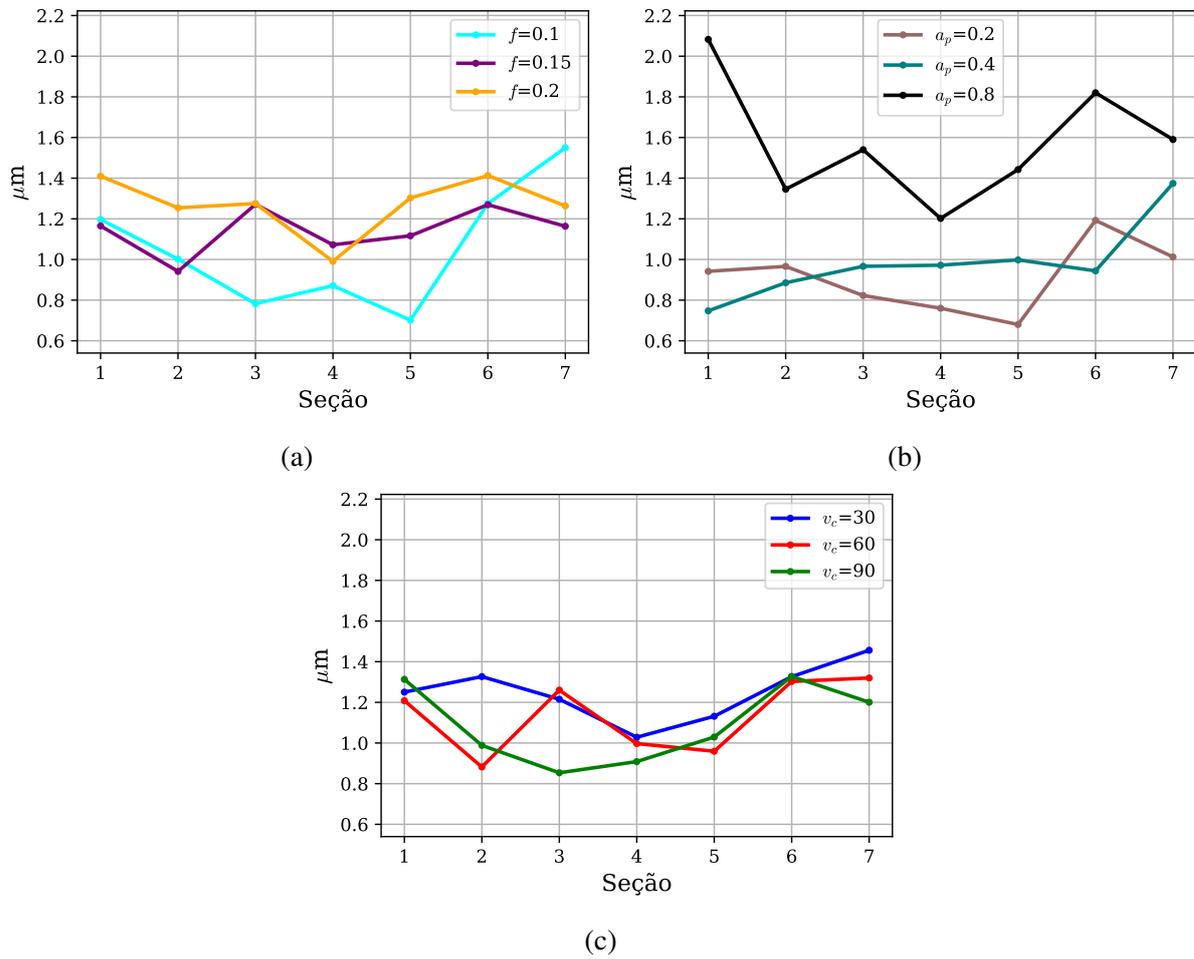
Figura 11 – Desvio dimensional em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).



Fonte: Autor

As médias de $RONp$ são mostradas, por sua vez, na Figura 12.

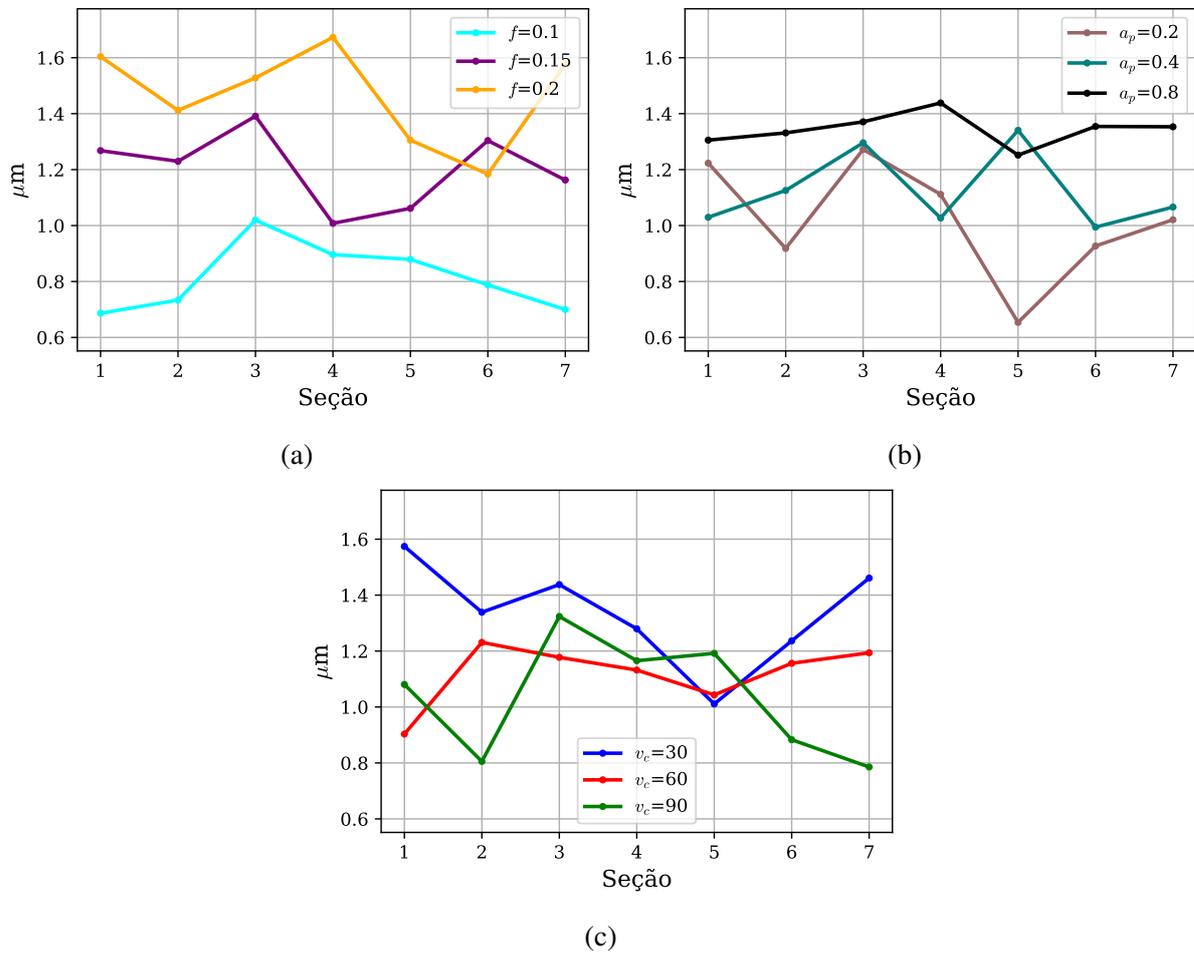
Figura 12 – Altura do maior pico $RONp$ em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).



Fonte: Autor

As médias de $RONv$ são representadas abaixo, na Figura 13.

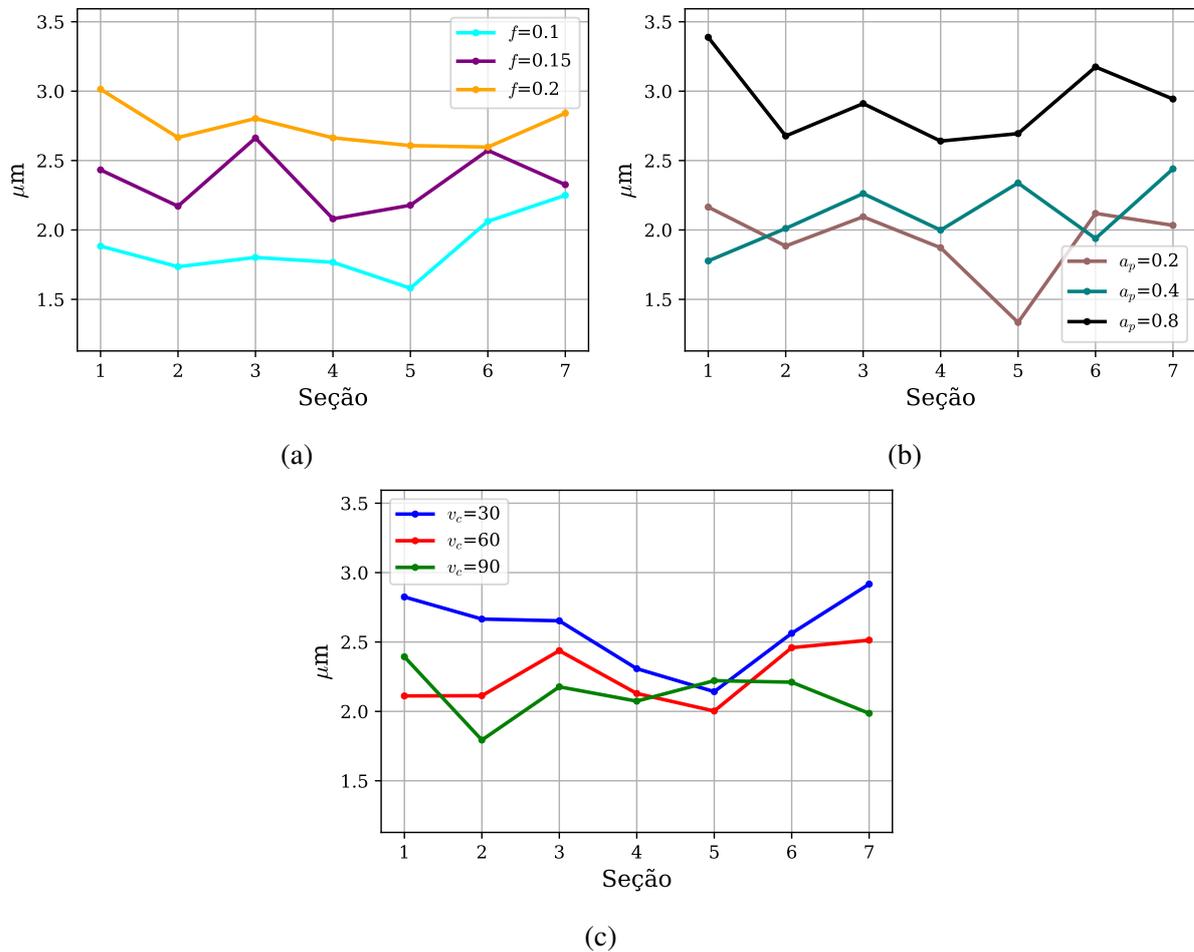
Figura 13 – Altura do maior vale RON_v em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).



Fonte: Autor

Por fim, médias de RON_t são mostradas na Figura 14 abaixo.

Figura 14 – Circularidade total $RONt$ em relação ao avanço f (a), à profundidade de usinagem a_p (b) e à velocidade de corte v_c (c).



Fonte: Autor

5.1 DESVIO DIMENSIONAL

O desvio dimensional apresentou tendência visualmente clara de redução ao longo do comprimento dos corpos de prova. Adicionalmente, as diferenças de desvio entre valores distintos de um mesmo parâmetro de usinagem são relativamente constantes quando comparadas às outras propriedades medidas

O aumento do avanço condiz com a redução do desvio dimensional, sendo que a diferença da média do desvio entre o maior avanço e o menor avanço são de menos de 0,04 mm para todas as seções, conforme a Figura 11a. É notável a proximidade das curvas do avanço mínimo e do avanço intermediário, sugerindo a existência de um limite em que, até o qual, a variação do avanço tem pouco efeito sobre a redução de desvio dimensional.

A profundidade de usinagem teve um impacto visível mais acentuado sobre o desvio dimensional. Novamente, o aumento do valor deste parâmetro condiz com a redução do desvio dimensional, sugerindo que entre os valores utilizados, a profundidade de usinagem de 0,8

mm é a que traz os melhores resultados. A diferença entre o valor intermediário e o mínimo de a_p é maior em relação ao avanço, porém continua menor do que a diferença entre o valor intermediário e o máximo, conforme a Figura 11b.

Em contraste, o valor de velocidade de corte que resultou nos menores valores de desvio dimensional foi o intermediário, de 60 m/min. As curvas resultantes das velocidades de corte máxima e mínima ficaram próximas uma da outra, porém ainda com uma diferença quase constante, conforme a Figura 11c.

5.2 CIRCULARIDADE, PICOS E VALES

No caso da circularidade, seja total, seja os picos ou vales, o avanço f de 0,2 mm corresponde aos maiores valores atingidos, salvo por pontos específicos. Seu efeito é mais notável, porém, na circularidade total $RONt$, na qual em todas as seções seu valor foi mais alto do que os outros dois valores menores de avanço, que se mantiveram equilibrados entre si.

Isto também é visível para a profundidade de usinagem máxima, de 0,8 mm, que corresponde aos maiores valores de circularidade. Neste caso porém, além da predominância deste no $RONt$, percebe-se que os picos mais ressaltados são caracterizados pelo a_p máximo, conforme pode ser visto na Figura 12b.

A velocidade de corte, conforme mencionado, afetou inversamente as propriedades da circularidade, sendo que no geral, a menor velocidade de corte v_c usada corresponde às peças cujos picos, vales e circularidade total foram as maiores. Entretanto, a diferença não é tão significativa quanto as que os outros parâmetros mostraram.

5.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Uma análise de variância utilizando o método de Taguchi foi feita com as propriedades obtidas para relacioná-las aos parâmetros de corte estatisticamente. Estão descritos na Tabela 4 e Tabela 5 os valores obtidos para o desvio dimensional. A “Média(Médias)” representa a média aritmética das médias aritméticas do valor de cada seção para peças com o mesmo valor de parâmetro de corte, enquanto “Média(SNs)” representa a média aritmética das SNs das peças com o mesmo valor de parâmetro de corte.

Tabela 4 – Análise de variância para o desvio dimensional

	SS	DOF	MS	F0	Falga=0,05	p-valor
v_c [m/min]	0,014	2	0,007	0,763	19,000	0,5672
f [mm]	0,013	2	0,007	0,723	19,000	0,5805
a_p [mm]	0,029	2	0,015	1,630	19,000	0,3802
Total	0,074	8				
Erro	0,018	2	0,009			

Fonte: Autor

Tabela 5 – Tabela de influência para o desvio dimensional

Parâmetro	Valor	Média(Médias) [μm]	Média(SNs) [dB]
v_c [m/min]	30	145	16,914
	60	119	18,629
	90	154	16,333
f [mm]	0,10	153	16,288
	0,15	145	17,170
	0,20	120	18,418
a_p [mm]	0,2	162	15,883
	0,4	146	16,732
	0,8	110	19,260

Fonte: Autor

Na Tabela 6 e Tabela 7, estão descritos os valores obtidos para RON_p .

Tabela 6 – Análise de variância para RON_p

	SS	DOF	MS	F0	Falfa=0,05	p-valor
v_c [m/min]	0,283	2	0,142	0,049	19,000	0,9535
f [mm]	0,508	2	0,254	0,087	19,000	0,9195
a_p [mm]	5,567	2	2,783	0,958	19,000	0,5108
Total	12,170	8				
Erro	5,812	2	2,906			

Fonte: Autor

Tabela 7 – Tabela de influência para RON_p

Parâmetro	Valor	Média(Médias) [μm]	Média(SNs) [dB]
v_c [m/min]	30	1,248	-1,705
	60	1,133	-1,279
	90	1,089	-0,812
f [mm]	0,10	1,054	-0,914
	0,15	1,143	-0,974
	0,20	1,273	-1,909
a_p [mm]	0,2	0,911	0,557
	0,4	0,984	-0,168
	0,8	1,575	-4,186

Fonte: Autor

Na Tabela 8 e Tabela 9, por sua vez, são mostrados os valores obtidos para RON_v .

Tabela 8 – Análise de variância para RON_v

	SS	DOF	MS	F0	Falfa=0,05	p-valor
v_c [m/min]	1,005	2	0,503	0,245	19,000	0,8033
f [mm]	4,551	2	2,275	1,109	19,000	0,4742
a_p [mm]	1,155	2	0,578	0,282	19,000	0,7803
Total	10,815	8				
Erro	4,104	2	2,052			

Fonte: Autor

Tabela 9 – Tabela de influência para RON_v

Parâmetro	Valor	Média(Médias) [μm]	Média(SN_s) [dB]
v_c [m/min]	30	1,334	-2,108
	60	1,120	-0,940
	90	1,034	-0,499
f [mm]	0,10	0,815	1,557
	0,15	1,204	-1,697
	0,20	1,469	-3,408
a_p [mm]	0,2	1,018	-0,216
	0,4	1,126	-1,006
	0,8	1,344	-2,325

Fonte: Autor

Os valores obtidos para RON_t , por fim, estão descritos na Tabela 10 e na Tabela 11.

Tabela 10 – Análise de variância para RON_t

	SS	DOF	MS	F0	Falfa=0,05	p-valor
v_c [m/min]	2,356	2	1,178	0,288	19,000	0,7767
f [mm]	8,031	2	4,015	0,980	19,000	0,5050
a_p [mm]	11,661	2	5,831	1,423	19,000	0,4127
Total	30,242	8				
Erro	8,194	2	4,097			

Fonte: Autor

Tabela 11 – Tabela de influência para $RONt$

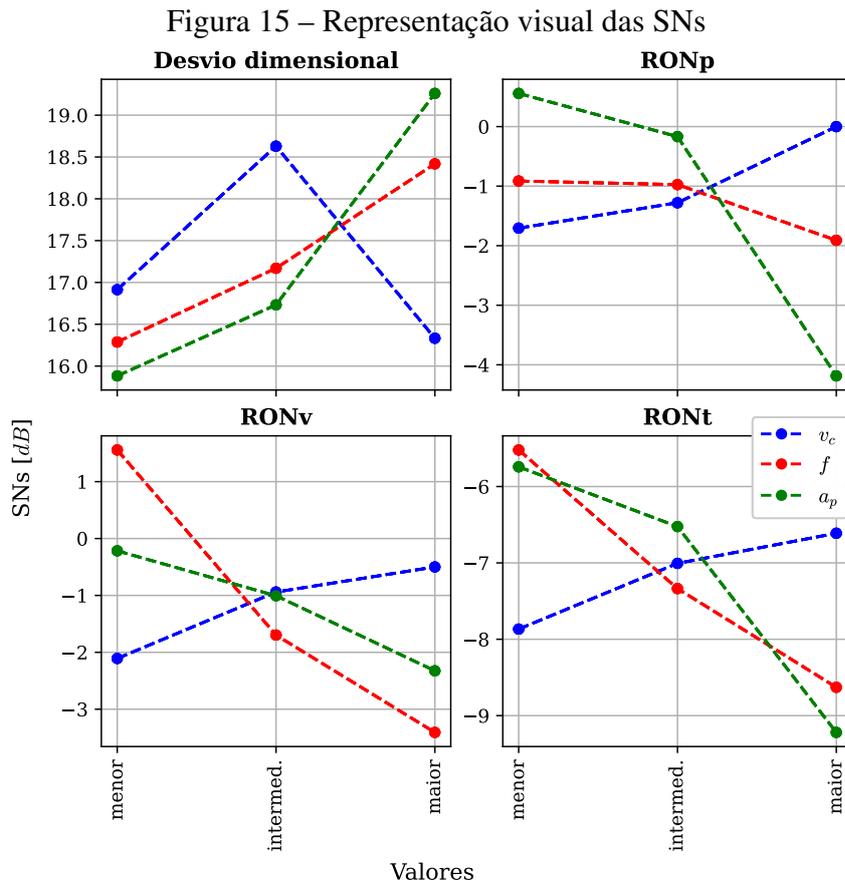
Parâmetro	Valor	Média(Médias) [μm]	Média(SNs) [dB]
v_c [m/min]	30	2,582	-7,867
	60	2,252	-7,006
	90	2,122	-6,612
f [mm]	0,10	1,868	-5,521
	0,15	2,346	-7,336
	0,20	2,742	-8,629
a_p [mm]	0,2	1,929	-5,742
	0,4	2,109	-6,524
	0,8	2,918	-9,220

Fonte: Autor

Considerando um intervalo de confiança de 95%, os p -valores mostram que não houve parâmetro de corte algum atuando como variável significativa para as propriedades estudadas, já que nenhum deste tiveram o p -valor menor do que 0,05.

A razão sinal-ruído (SNs) é definida como a razão entre média e o desvio padrão e é usada para medir o desvio da qualidade de uma característica em relação a um valor desejado. Especificamente, para características que são consideradas mais desejáveis quanto menores forem seus valores (PHILIP SELVARAJ; CHANDRAMOHAN; MOHANRAJ, 2014). Os valores da razão sinal-ruído SNs obtidos para o experimento estão representados na Figura 15. Na figura, as marcas de “menor”, “médio” e “maior” correspondem aos valores em ordem crescente da cada um dos parâmetros de corte, v_c , f e a_p , conforme a Tabela 3. É possível observar a variação irregular de v_c em relação aos outros parâmetros para o desvio dimensional, reforçando a observação de que o valor intermediário de velocidade de corte traz os resultados mais "desejados" de desvio dimensional conforme a Figura 11c. Na avaliação da razão SNs , um valor maior indica uma proximidade maior dos dados com o valor esperado, o que no caso da Figura 11c, seria o desvio geométrico teórico de zero. O maior valor de SNs para v_c é de 18,629 dB para v_c de 60 m/min, que condiz com a proximidade da curva à linha zero, enquanto o v_c de 30 m/min, de 16,914 dB, tem sua linha mais distante da linha zero.

Apesar de a análise de variância não mostrar variáveis significativas para nenhuma das outras propriedades estudadas, a razão SNs mostra a influência de cada parâmetro sobre os dados experimentais, possibilitando a observação de como a variação de valores de parâmetros de corte distanciaram os resultados obtidos de um resultado teórico ideal. É observável na Figura 15 que o aumento do avanço e da profundidade de usinagem criaram a tendência de redução da SNs , enquanto o aumento da velocidade de corte provocou, na maioria, um aumento da SNs .



Fonte: Autor

5.4 COMPARAÇÃO COM TOLERÂNCIA DIMENSIONAL E LIMITES DE CIRCULARIDADE

Timings (2006) estabelece que os valores típicos de graus de tolerância IT para torneamento estão entre IT11 e IT7. Sendo assim, com o diâmetro nominal das peças classificado na categoria de dimensão nominal entre 10 e 18 mm, é esperada uma tolerância entre 11 μm e 110 μm (ABNT, 1994). Entretanto, os valores de desvio dimensional obtidos fogem dos limites de tolerância esperados, sendo que o maior valor encontrado foi 221 μm , essencialmente o dobro da tolerância em IT11. Adicionalmente, a análise das propriedades estudadas não trouxe uma explicação para a redução quase linear do desvio no comprimento das peças, já que a redução era presente independente do parâmetro em estudo.

Agostinho, Rodrigues e Lirani (2020) estabelecem que para o torneamento, pode-se tomar 10 μm como o limite de tolerância de circularidade. A circularidade máxima encontrada nos corpos de prova foi de 4,7 μm e, portanto, se encontram dentro do limite estabelecido.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado que o desvio dimensional, em geral, era decrescente conforme o aumento da distância entre a seção e a base da peça. Porém a variação do desvio de circularidade não trouxe uma sugestão de explicação para este fenômeno, já que este não mostrou uma relação clara com a distância a partir da base. Em alguns casos, a circularidade total era maior na primeira seção, cuja distância à base era a menor. É possível que tal fenômeno seja causado pela máquina geratriz, porém a avaliação de outras peças nela produzidas seria necessário para confirmar essa possibilidade. Sendo assim, uma análise posterior seria necessária para poder compreender a causa do desvio geométrico decrescente.

Os três parâmetros de usinagem estudados aparentaram ter efeitos semelhantes sobre a amplitude do desvio dimensional. Para o avanço f e profundidade de usinagem a_p , o aumento do valores do parâmetro condiz com a redução do desvio dimensional, com a ressalva de que os dois menores valores ficaram próximos quando comparados à distância entre o valor intermediário e o maior. A velocidade de corte v_c , por sua vez, mostrou o menor desvio dimensional com seu valor intermediário, enquanto as curvas dos valores máximo e mínimo ficaram próximas uma da outra. Este comportamento é reforçado pela razão sinal-ruído, que indica que o valor intermediário de velocidade de corte apresenta os resultados mais próximos dos desejados.

O avanço pareceu ter pouco efeito sobre a altura dos picos, porém foi clara a sobressalência visual do avanço de maior valor, de 0,2 mm, sobre os outros em relação à altura dos vales. O avanço de 0,2 mm também foi o que gerou o maior desvio de circularidade total, já que este é uma soma de cada vale e pico. Porém a análise de variância não mostrou significância estatística deste parâmetro sobre nenhuma das propriedades.

A profundidade de usinagem máxima usada teve efeito visível sobre os três parâmetros analisados de circularidade, principalmente nos picos e na circularidade máxima. A profundidade de usinagem média e a intermediária tiveram pouca diferença entre si em relação à influência aos parâmetros, observação reforçada pelas razões SNs , onde a variação de decibéis entre o a_p de 0,2 mm e 0,4 mm sempre foi menor do que entre 0,4 mm e 0,8 mm.

As velocidades de corte, por sua vez, aparentemente tiveram pouca influência na variação de desvio de circularidade, já que para os três valores de velocidade utilizados, não houve um que fosse predominante. Porém foi observado o inverso do que ocorreu com os outros dois parâmetros: valores maiores de velocidade de corte tendem a influenciar desvios de circularidade menores. Isto é mais claramente visível na circularidade total, enquanto os picos e os vales foram mais equilibradamente influenciados e é reforçado pela análise das razões SNs .

Quando comparados aos limites determinados em literatura, os valores de desvio dimensional mensurados ultrapassaram o esperado, sendo que o maior desvio encontrado foi de 221 μm , enquanto os limites de circularidade se mantiveram dentro do estabelecido.

Apesar dos resultados serem inconclusivos sobre as variáveis significativas para cada

um das propriedades da peça final estudadas, foi possível observar como a variação de cada parâmetro de corte influenciou na geometria final, quando a influência era existente. Desta maneira, é possível buscar combinações de parâmetros que produzam os melhores resultados em cada situação; os mesmos valores de um parâmetro influenciaram de maneiras diferentes, ou até mesmo opostas, o desvio dimensional e a circularidade, portanto não é provável um combinação entregue os melhores resultados em todos os quesitos.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, C. d. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Blucher, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F136 - 13**: Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401). [S.l.], 2009. v. 13, n. Reapproved, 1–5 p.
- ASAO, T. et al. Precision Turning by Means of a Simplified Predictive Function of Machining Error. **CIRP Annals**, v. 41, n. 1, p. 447–450, 1992. ISSN 00078506. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607612414>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6158**: Sistema de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro, 1994.
- BREHL, D. E.; DOW, T. A. Review of vibration-assisted machining. **Precision Engineering**, v. 32, n. 3, p. 153–172, 2008. ISSN 01416359.
- BREME, J.; EISENBARTH, E.; BIEHL, V. Titanium and its Alloys for Medical Applications. In: LEYENS, C.; PETERS, M. (Ed.). **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. 1. ed. Köln: Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. cap. 16, p. 532. ISBN 3-527-30534-3.
- CHEN, Q.; THOUAS, G. A. Metallic implant biomaterials. **Materials Science and Engineering R: Reports**, Elsevier B.V., v. 87, p. 1–57, 2015. ISSN 0927796X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001>>.
- COGORNO, G. R. **Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design**. 3. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2006.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Editora Artliber, 2013.
- ELIAS, C. N. et al. Biomedical applications of titanium and its alloys. **Jom**, v. 60, n. 3, p. 46–49, 2008. ISSN 10474838.
- GOMES, C. C. et al. Assessment of the genetic risks of a metallic alloy used in medical implants. **Genetics and Molecular Biology**, v. 34, n. 1, p. 116–121, 2011. ISSN 14154757.
- HU, K. et al. Study on Influence of Ultrasonic Vibration on the Ultra-Precision Turning of Ti6Al4V Alloy Based on Simulation and Experiment. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 33640–33651, 2019. ISSN 21693536.
- JIANLIANG, G.; RONGDI, H. A united model of diametral error in slender bar turning with a follower rest. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 9, p. 1002–1012, jul. 2006. ISSN 08906955. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002063>>.
- KAUR, M.; SINGH, K. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. **Materials Science and Engineering C**, Elsevier, v. 102, n. December 2018, p. 844–862, 2019. ISSN 18730191. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.064>>.

LONG, M.; RACK, H. J. Titanium alloys in total joint replacement - a materials science perspective. **Biomaterials**, v. 19, p. 1621–1639, 1996. ISSN 10990720.

MANIKANDAN, H.; BERA, T. C. Modelling of dimensional and geometric error prediction in turning of thin-walled components. **Precision Engineering**, v. 72, p. 382–396, nov. 2021. ISSN 01416359. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635921001562>>.

MAYER, J. R. R.; PHAN, A.-V. u.; CLOUTIER, G. Prediction of diameter errors in bar turning: a computationally effective model. **Applied Mathematical Modelling**, Elsevier, Montréal, v. 24, p. 943–956, 2000.

OLDANI, C.; DOMINGUEZ, A. Titanium as a Biomaterial for Implants. **Recent Advances in Arthroplasty**, n. January, 2012.

PEREIRA, A. G. **Aplicação do shunt piezoelétrico para controle passivo de chatter no processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI**. 66 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

PHILIP SELVARAJ, D.; CHANDRAMOHAN, P.; MOHANRAJ, M. Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using taguchi method. **Measurement**, v. 49, p. 205–215, 2014. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224113005903>>.

SAMSUDEENSADHAM, S. et al. An analysis on the effect of machining parameters on surface quality during dry machining of Ti-6Al-4V alloy. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 2814–2823, 2020. ISSN 22147853. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320321933>>.

SARAVANAKUMAR, A. et al. Optimization of CNC Turning Parameters on Aluminum Alloy 6063 using TaguchiRobust Design. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 8290–8298, 2018. ISSN 22147853. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785317327906>>.

SITI NUR HAZWANI, M. R. et al. Fabrication of titanium-based alloys with bioactive surface oxide layer as biomedical implants: Opportunity and challenges. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, The Nonferrous Metals Society of China, v. 32, n. 1, p. 1–44, 2022. ISSN 22103384. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65776-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65776-X)>.

SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 7-8, p. 561–568, 2009. ISSN 08906955.

TIMINGS, R. L. **Mechanical Engineer's pocket book**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2006. 768 p.

Apêndices

APÊNDICE A – CÓDIGO EM PYTHON UTILIZADO PARA PROCESSAMENTO DOS DADOS

```
1 import os
2 import pandas as pd
3 import json
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import numpy as np
6 from pdf2image import convert_from_path
7 from PIL import Image
8 from scipy import signal
9
10
11 # Obter a lista de arquivos na pasta com extensão específica
12 def obter_arquivos(extensao_arq, pasta=os.getcwd()):
13     os.chdir(pasta)
14     todos_arq = os.listdir()
15     arq_extensao = [arqu for arqu in todos_arq if arqu.endswith
16                     (extensao_arq)]
17     return arq_extensao
18
19 # Extraí o texto do PDF e retorna como string única
20 def extrair_texto(nome_arq):
21     import PyPDF2
22     with open(nome_arq, 'rb') as obj_arq_pdf:
23         leitor_pdf = PyPDF2.PdfFileReader(obj_arq_pdf)
24         obj_pagina = leitor_pdf.getPage(0)
25         texto_str = obj_pagina.extractText()
26     return texto_str
27
28
29 # Determina se a variável str pode ser convertida para float
30 def e_float(string):
31     try:
32         float(string.replace(',', ' '))
33         resp = True
34     except ValueError:
```

```
35     resp = False
36     return resp
37
38
39 # Extrair os valores relevantes apenas e converte de str para
    float
40 def processar_valores(texto_str):
41     linhas = texto_str.splitlines()
42     indice_param_1 = linhas.index('Parâmetros', 0)
43     lines = linhas[indice_param_1 + 1:]
44     val = [float(y.replace(',', '.')) for y in lines if e_float
            (y) is True]
45     return val
46
47
48 # Extrair o nome dos parâmetros e as unidades
49 def param_unid(texto_str):
50     lines = texto_str.splitlines()
51     idx_param_1 = lines.index('Parâmetros', 0)
52     lines = lines[idx_param_1 + 1:]
53     names = []
54     unit = []
55     for n in range(len(lines)-2):
56         if e_float(lines[n+2]) is True:
57             names.append(lines[n])
58             unit.append(lines[n+1])
59     return names, unit
60
61
62 # Carrega o arquivo txt como dicionário
63 def txt2dict(folder, filename):
64     os.chdir(folder)
65     with open(filename) as file:
66         data = file.read()
67         json_data = json.loads(data)
68     return json_data
69
70
71 # Cria e aplica o filtro Butterworth passa-alta
```

```
72 def filt_alta_butter(dados, cutoff, fs, order=6):
73     nyq = 0.5 * fs
74     normal_cutoff = cutoff / nyq
75     b, a = signal.butter(order, normal_cutoff, btype='high',
76                         analog=False)
76     filt = signal.filtfilt(b, a, dados)
77     return filt
78
79
80 # Formata as figuras criadas com um dicionário de parâmetros
81 def formatar_figura(obj_fig, dicio_param, nome_arq, save=False)
82     :
83     ax = plt.gca()
84     obj_fig.set_size_inches(dicio_param['Tam.'])
85     plt.ylabel(dicio_param['YLabel'])
86     plt.xlabel(dicio_param['XLabel'])
87     plt.title(dicio_param['Título'])
88     plt.grid
89     if dicio_param['XLim'] is not None:
90         ax.set_xlim(dicio_param['XLim'])
91     if dicio_param['YLim'] is not None:
92         ax.set_ylim(dicio_param['YLim'])
93     if save is True:
94         obj_fig.savefig(nome_arq)
95
96 """
97 Extração dos parâmetros dos PDFs
98 """
99 PDFs = obter_arquivos('.pdf')
100 dados = []
101 valores = []
102 for fn in PDFs:
103     dados.append(extrair_texto(fn))
104 nome_param, unidades = param_unid(dados[0])
105 for pdf in dados:
106     valores.append(processar_valores(pdf))
107 dados_dataframe = pd.DataFrame([nome_param] + valores + [
108     unidades])
```

```
108 dados_dataframe.to_excel('medicao_circ_dados.xlsx',
109                          sheet_name='Dados', index=False,
110                          header=False)
111
112 # Numeração das peças
113 pecas = ['Peça ' + str(num) for num in range(1, 10)]
114
115 dic_dados = {}
116 for numpeca, nompeca in enumerate(pecas):
117     dic_dados[nompeca] = {}
118     for n, name in enumerate(nome_param):
119         val_y = []
120         for section in range(1 + 7*numpeca, 8 + 7*numpeca):
121             val_y.append(valores[section-1][n])
122         dic_dados[nompeca][name] = val_y
123
124 """
125 Extração os gráficos dos PDFs
126 """
127 # Dimensões do corte da figura (Esq, topo, direita, base)
128 dimens = (500, 550, 3800, 2050)
129 for arq in PDFs:
130     imgs_PDF = convert_from_path(os.getcwd()+"\\"+arq, fmt="png",
131                                 dpi=400)
132     img_grafico_extraido = imgs_PDF[0].crop(dimens)
133     img_grafico_extraido.save(arq[:-3] + 'png')
134
135 """
136 Extração dos pontos de dados dos gráficos extraídos dos PDFs,
137 através de
138 diferenciação da cor do píxel.
139 """
140 imagens = PDFs[:-4]
141 array_dicio = {}
142 coord = {}
143 zeros_dicio = {}
144 zeros = []
```



```
                                imagens))
175 limites = RON_dados.values.tolist()
176 val_uniq, sinal = {}, {}
177 for enum_i, img in enumerate(imagens):
178     linha, coluna, x, y = np.array([]), np.array([]), [], []
179     for line in coord[img]:
180         linha = np.append(linha, line[0])
181         coluna = np.append(coluna, line[1])
182     val_uniq[img] = {}
183     for col in coluna:
184         is_unique = np.where(x == col)
185         if len(is_unique[0]) == 0:
186             media_col = np.mean(list(linha[np.where(coluna ==
187                                     col)]))
188             x.append(col)
189             y.append(media_col)
190     y_zero = [-(yv - zeros[enum_i]) for yv in y]
191     val_uniq[img] = [x - min(x), y_zero[:]]
192
193 for num, img in enumerate(imagens):
194     quo_y_max = limites[num][0]/max(val_uniq[img][1])
195     quo_y_min = -limites[num][1]/min(val_uniq[img][1])
196     y_fix = [quo_y_max*y if y > 0 else quo_y_min*y for y in
197             val_uniq[img][1]]
198     x_fix = list(360/max(val_uniq[img][0])*val_uniq[img][0])
199     sinal[img] = [x_fix, y_fix]
200
201 """
202 Aplicação de filtro nos dados para eliminar erro de
203 posicionamento
204 """
205 # Padronizando o intervalo de ângulo. A maioria dos intervalos
206 são de cerca de
207 # 0.13 graus, porém alguns são de 0.26 graus. O sinal é então
208 limitado a taxa
209 # de amostragem de 0.26 graus.
210 normal = {}
211 for img in imagens:
```

```
208     xy = sorted(zip(sinal[img][0], sinal[img][1]))
209     x_normal = [xy[0][0]]
210     y_normal = []
211     lista_ind = []
212     for tam in range(1, len(xy)):
213         if tam not in lista_ind:
214             if xy[tam][0] - xy[tam-1][0] > 0.13:
215                 lista_ind.append(tam)
216                 x_normal.append(xy[tam][0])
217                 y_normal.append(xy[tam][1])
218             else:
219                 try:
220                     lista_ind.append(tam+1)
221                     x_normal.append(xy[tam+1][0])
222                     y_normal.append(xy[tam+1][1])
223                 except IndexError:
224                     continue
225     normal[img] = [x_normal, y_normal]
226
227 dados_welch = {}
228 for img in imagens:
229     dados_welch[img] = {}
230     freq_amost = 1/(normal[img][0][1])
231     window = signal.get_window('hamming', len(normal[img][0])
232         -1)
233     freq_welch, amp_welch = signal.welch(normal[img][1], fs=
234         freq_amost,
235         window=window,
236         noverlap=freq_amost
237         /2,
238         axis=0, scaling="
239         density",
240         detrend=False)
241     dados_welch[img]['Freq'] = list(freq_welch)
242     dados_welch[img]['Amp'] = list(amp_welch)
243     np.savetxt(img+"_PSD.csv", 10*np.log10(amp_welch),
244         delimiter=",")
245     indice_max = np.where(amp_welch == max(amp_welch))
246     normal[img].append(freq_welch[indice_max[0][0]])
```

```
241
242     fig = plt.figure()
243     titulo = 'Peça ' + img[1] + ' - Seção ' + img[-1] + ' - PSD
        '
244     x, y = zip(*sorted(zip(freq_welch, amp_welch)))
245     plt.plot(x, y, linewidth=1.0)
246     nome_arq = 'PSD_' + img + '_python.svg'
247     params_format = {'Size': (22/2.54, 10/2.54),
248                     'YLabel': r'Amplitude [dB/Hz]', 'XLabel':
                        r'Freq. [Hz]',
249                     'Título': titulo, 'XLim': (0, 0.5), 'YLim'
                        : None}
250     formatar_figura(fig, params_format, nome_arq=nome_arq, save
        =True)
251
252     filtrado_json = {}
253     sinal_fil = {}
254     for img in imagens:
255         freq_amost = 1/(normal[img][0][1])
256         Wn = normal[img][2]
257         sinal_fil[img] = filt_alta_butter(normal[img][1], Wn,
        freq_amost)
258
259     fig = plt.figure()
260     ax = plt.gca()
261     x, y = zip(*sorted(zip(sinal[img][0], sinal[img][1])))
262     xf, yf = zip(*sorted(zip(normal[img][0], sinal_fil[img])))
263     filtrado_json[img] = {'Pos': xf, 'Amp': yf}
264     plt.plot(x, y, linewidth=1.0, color='teal', label='Original
        ')
265     plt.plot(xf, yf, linewidth=1.5, color='red', label='
        Filtrado')
266     titulo = 'Peça ' + img[1] + ' - Seção ' + img[-1]
267     plt.legend()
268     ylim_auto = ax.get_ylim()
269     ylim_abs = [abs(ylim_auto[0]), abs(ylim_auto[1])]
270     ylims = (-max(ylim_abs), max(ylim_abs))
271     ax.set_xticks(np.arange(0, 361, 20))
272     nome_arq = img + '_filt_' + str(Wn) + 'Hz.svg'
```

```
273     params_format = {'Size': (22/2.54, 10/2.54), 'YLabel': r'  
        Posição [°]',  
274                 'XLabel': r'RON [ $\mu\text{m}$ ]', 'Título':  
                    titulo,  
275                 'XLim': (0, 360), 'YLim': ylims}  
276     formatar_figura(fig, params_format, nome_arq=nome_arq, save  
                    =True)  
  
277  
278  
279     """  
280     Comparar parâmetros  
281     """  
282     with open('dados_pecas_usinagem.json', 'r') as  
        arq_dados_usinagem:  
283         obj_dados_usinagem = arq_dados_usinagem.read()  
284         dados_usin = json.loads(obj_dados_usinagem)  
285         sinais = filtrado_json  
286  
287         params = {}  
288         for peca in dados_usin:  
289             params[peca] = {}  
290             params[peca]['Par. corte'] = dados_usin[peca]['Par. corte']  
291             params[peca]['Desvio dim'] = dados_usin[peca]['Desvio dim']  
292             keys = [key for key in sinais if key.startswith(peca)]  
293             RONp, RONv, RONT = [], [], []  
294             for key in keys:  
295                 RONp.append(max(sinais[key]['Amp']))  
296                 RONv.append(-min(sinais[key]['Amp']))  
297                 RONT.append(max(sinais[key]['Amp'])-min(sinais[key]['  
                    Amp'])))  
298             params[peca]['RONp'] = RONp  
299             params[peca]['RONv'] = RONv  
300             params[peca]['RONT'] = RONT  
301  
302     param_relevantes = ['RONp', 'RONv', 'RONT', 'Desvio dim']  
303     unid_relev = [' $\mu\text{m}$ ', ' $\mu\text{m}$ ', ' $\mu\text{m}$ ', 'mm']  
304  
305     media = {  
306         'Vc': {30: {x: None for x in param_relevantes},
```

```
307         60: {x: None for x in param_relevantes},
308         90: {x: None for x in param_relevantes}},
309     'f': {0.1: {x: None for x in param_relevantes},
310          0.15: {x: None for x in param_relevantes},
311          0.2: {x: None for x in param_relevantes}},
312     'ap': {0.2: {x: None for x in param_relevantes},
313           0.4: {x: None for x in param_relevantes},
314           0.8: {x: None for x in param_relevantes}}
315     }
316
317
318 for vc_num, vc in enumerate([30, 60, 90]):
319     q_peca = []
320     val = [[], [], []]
321     soma = np.linspace(0, 0, 7)
322     for peca in params:
323         if params[peca]['Par. corte'][0] == vc:
324             q_peca.append(peca)
325     for para in param_relevantes:
326         val[0] = np.array(params[q_peca[0]][para])
327         val[1] = np.array(params[q_peca[1]][para])
328         val[2] = np.array(params[q_peca[2]][para])
329         media['Vc'][vc][para] = (val[0] + val[1] + val[2]) / 3
330
331 for f_num, f in enumerate([0.1, 0.15, 0.2]):
332     q_peca = []
333     val = [[], [], []]
334     soma = np.linspace(0, 0, 7)
335     for peca in params:
336         if params[peca]['Par. corte'][1] == f:
337             q_peca.append(peca)
338     for para in param_relevantes:
339         val[0] = np.array(params[q_peca[0]][para])
340         val[1] = np.array(params[q_peca[1]][para])
341         val[2] = np.array(params[q_peca[2]][para])
342         media['f'][f][para] = (val[0] + val[1] + val[2]) / 3
343
344 for ap_num, ap in enumerate([0.2, 0.4, 0.8]):
345     q_peca = []
```

```
346     val = [[], [], []]
347     soma = np.linspace(0, 0, 7)
348     for peca in params:
349         if params[peca]['Par. corte'][2] == ap:
350             q_peca.append(peca)
351     for para in param_relevantes:
352         val[0] = np.array(params[q_peca[0]][para])
353         val[1] = np.array(params[q_peca[1]][para])
354         val[2] = np.array(params[q_peca[2]][para])
355         media['ap'][ap][para] = (val[0] + val[1] + val[2]) / 3
356
357 for n_k, k in enumerate(param_relevantes):
358     max_param = []
359     min_param = []
360     ax = []
361     fig_num = []
362     nome_arq = []
363     for n_h, h in enumerate(['Vc', 'f', 'ap']):
364         fig = plt.figure(n_k*10+n_h)
365         fig_num.append(n_k*10+n_h)
366         ax.append(plt.gca())
367         fig.set_size_inches(13/2.54, 9/2.54)
368         for key in [key for key in media[h]]:
369             xs, ys = zip(*sorted(zip(range(1, 8), media[h][key]
370                                   ] [k])))
371             max_param.append(max(ys))
372             min_param.append(min(ys))
373             plt.plot(xs, ys, marker='.', linewidth=2.0, label=h
374                     +' '+str(key))
375         plt.xlabel('Seção')
376         plt.ylabel(unid_relev[n_k])
377         plt.title(k, fontweight='bold')
378         plt.grid()
379         plt.legend()
380         nome_arq.append(k+'_'+h+'.pdf')
381     yliml = min(min_param)
382     ylimh = max(max_param)
383     for figura, eixo in enumerate(ax):
384         eixo.set_ylim(yliml-0.1*(ylimh-yliml), ylimh+0.1*(ylimh
```

```
        -yliml))  
383     fig = plt.figure(fig_num[figura])  
384     fig.savefig(nome_arq[figura])
```