

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTOS ACADÊMICOS DE ELETRÔNICA E MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL

BLANCALIZ HIGASKINO DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL EM
AMBIENTE MATLAB PARA ANÁLISE DA TEXTURA DE
SUPERFÍCIES COMPATÍVEL COM A TÉCNICA DE PERFILOMETRIA
OPTICA 3D SEM CONTATO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

BLANCALIZ HIGASKINO DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL EM
AMBIENTE MATLAB PARA ANÁLISE DA TEXTURA DE
SUPERFÍCIES COMPATÍVEL COM A TÉCNICA DE PERFILOMETRIA
OPTICA 3D SEM CONTATO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, dos Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Walter Luís Mikos

CURITIBA
2016

TERMO DE APROVAÇÃO

BLANCALIZ HIGASKINO DE LIMA

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL EM AMBIENTE MATLAB PARA ANÁLISE DA TEXTURA DE SUPERFÍCIES COMPATÍVEL COM A TÉCNICA DE PERFILOMETRIA OPTICA 3D SEM CONTATO

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 16 de maio de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Milton Luiz Polli
Coordenador de Curso
Departamento Acadêmico de Mecânica

Prof. Msc. Sérgio Moribe
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso
Departamento Acadêmico de Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Hioki
UTFPR

Prof. Dr. João Vicente Falleiro Salgado
UTFPR

Prof. Dr. Walter Luis Mikos
Orientador - UTFPR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Deus por ter dado força para a realização deste trabalho. Aos pais e família pela compreensão, e pleno incentivo. Ao Professor e Orientador Walter Luís Mikos pela atenção, disposição, orientação e incentivo de sempre. Aos amigos professores e bolsistas do Laboratório de Metrologia da UTFPR.

RESUMO

HIGASKINO DE LIMA, Bláncaliz. **Desenvolvimento de um modelo computacional em ambiente matlab para análise da textura de superfícies compatível com a técnica de perfilometria óptica 3d sem contato.** 2016. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Tendo em vista a importância da medição e caracterização de superfícies em escalas cada vez menores, desenvolver métodos de medição e caracterização das superfícies torna-se, cada vez mais, um desafio tanto para a pesquisa científica quanto para a pesquisa tecnológica aplicada, pois o desenvolvimento de novos produtos com desempenho funcional inovador depende, fundamentalmente, da capacidade da indústria de fabricar e controlar superfícies com características muito particulares. Neste contexto, o presente trabalho mostra o desenvolvimento, de um modelo matemático a partir dos pontos de uma superfície, com o MATLAB[®], para a análise e o cálculo dos parâmetros que a caracterizam, assim tornando independente, a análise de superfícies de sistemas de caracterização já existentes

Palavras chave: Matlab. Caracterização. Superfície. Ferramentas.

ABSTRACT

HIGASKINO DE LIMA, Biancaliz. **Development of a computer model in Matlab for analysis of surface texture compatible with 3D optical profilometer technique without contact.** 2016. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Given the importance of measurement and characterization of surfaces in smaller and smaller scales, developing methods of measurement and characterization of surfaces becomes increasingly a challenge both for scientific research and for technological research applied as the development of new products with innovative functional performance depends fundamentally on the industry ability to manufacture and control surfaces with particular characteristics. In this context, the present work shows the development of a mathematical model from the points of a surface, with MATLAB[®], for the analysis and computation of parameters that characterize it, thus becoming independent, the analysis of existing system surfaces characterization.

Keywords: Matlab. Characterization. Surface. Tools.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma da Análise de superfícies.	14
Figura 2: A etapa Fitting.	15
Figura 3: Surface roughness and waviness.....	16
Figura 4: Exemplificando dois valores diferentes de <i>cutoff</i>	18
Figura 5: Gráfico com as características de transmissão de cada <i>cutoff</i> , rugosidade, ondulação e forma.....	18
Figura 6: Distribuição das Alturas. Skewness e Kurtosis.	21
Figura 7: Comandos do MATLAB®.....	21
Figura 8: Importação dos dados da superfície para o MATLAB®.	24
Figura 9: Comando Prepare Surface Data	24
Figura 10: Comando Table e Fit.....	25
Figura 11: Superfície Plotada e Perfil.....	25
Figura 12: Resíduos do Perfil.....	25
Figura 13: Basic Fitting aplicado ao perfil.....	26
Figura 14: Resultado obtido ao processamento de alguns parâmetros.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores recomendados para <i>Cut-off</i>	17
Tabela 2: Resultados dos Parâmetros de superfície obtidos através do Talymap e MATLAB.....	28
Tabela 3: Resultados dos Parâmetros de Perfil obtidos através do Talymap e MATLAB.....	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	TEMA	10
1.2	PROBLEMA	11
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	GERAL	11
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4	JUSTIFICATIVA	12
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	FITTING	14
2.2	FILTERING	15
2.2.1	CUTOFF	16
2.3	FILTRO GAUSS	18
2.4	TRANSFORMADA DE FOURIER	19
2.5	PARÂMETROS	19
2.5.1	PARÂMETROS DE AMPLITUDE 3D	19
2.5.2	PARÂMETROS DE AMPLITUDE 2D	22
2.6	MATLAB	22
3	DESENVOLVIMENTO	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5	CONCLUSÕES	28
	REFERÊNCIAS	30
	APÊNDICE	32

1 INTRODUÇÃO

A topografia de uma superfície tem uma influência preponderante sobre o seu desempenho funcional. E, neste sentido, Leach (2013a) revela que existem diversos exemplos conhecidos na natureza, nos quais as características topográficas determinam um desempenho funcional extraordinário, tais como: o efeito hidrofóbico apresentado pela folha de lótus, o efeito altamente fluidodinâmico proporcionado pela estrutura de dentículos microscópicos na pele do tubarão, a incrível adesão direcional da estrutura do pé de uma lagartixa ou, ainda, a sensibilidade angular do olho multifacetado da mosca.

Dentro desta mesma lógica, o desempenho funcional de um componente manufaturado, também, depende das características da topografia de sua superfície, especialmente relacionadas com as propriedades micro fluídicas, tribológicas, ópticas, biológicas, entre outras Leach (2013b).

Neste sentido, Leach (2013b) indica que uma superfície é usualmente definida como a característica do componente ou dispositivo que interage com o ambiente no qual esse componente é montado ou no qual o dispositivo deve operar ou, ainda, como interage com outras superfícies.

Todavia, é importante destacar, que a lista de termos e definições encontradas na literatura dessa área de pesquisa é bastante abrangente. Assim, neste trabalho, para manter a coerência, adotam-se as definições apresentadas nas normas ISO 4287, ISO 13565-2, ASME B46.1 e em Leach (2013b).

Neste contexto, a topografia de uma superfície pode ser entendida como um conjunto de características globais da superfície de um componente manufaturado considerado com um continuum de diferentes comprimentos de onda espaciais (λ). Esse conjunto é formado pela forma que compreende os comprimentos de onda maiores (p.e. representados pelos desvios da superfície em relação a uma forma plana de referência) e a textura da superfície é determinada pelos comprimentos de onda menores (p.e. os desvios que restam após a remoção ou filtragem dos desvios de forma considerando dado comprimento de onda de corte λ_c) Leach (2013b).

Neste contexto, nos últimos anos, as técnicas empregadas para caracterizar a topografia das superfícies compreendem desde técnicas de medição com apalpadores (stylus), nas quais um perfil bidimensional da superfície é construído a

partir de uma linha ao longo da superfície, sendo representado matematicamente por uma função que relaciona a altura dos picos e vales da superfície com o deslocamento lateral $z(x)$ e, mais recentemente, mediante uma ampla gama de novas técnicas óticas capazes de realizar agora um mapeamento tridimensional da superfície, $z(x,y)$.

Embora, estas diferentes técnicas de medição e caracterização tenham suas vantagens e limitações intrínsecas, é possível perceber na literatura uma clara indicação de uma mudança de paradigma, em função da necessidade de se mensurar as geometrias dos produtos em escalas cada vez menores incluindo as nanométricas e atômicas, o que tem impulsionado o desenvolvimento da metrologia de superfícies: da obtenção de perfis bidimensionais (2D) para o mapeamento tridimensional (3D) (Jiang, 2007).

Portanto, desenvolver métodos de medição e caracterização das superfícies torna-se, cada vez mais, um desafio tanto para a pesquisa científica quanto para a pesquisa tecnológica aplicada, pois o desenvolvimento de novos produtos com desempenho funcional inovador depende, fundamentalmente, da capacidade da indústria de fabricar e controlar superfícies com características muito particulares.

1.1 TEMA

O acabamento da superfície é a conexão fundamental entre um componente, o processo de fabricação que o gerou, e o que se espera dele (Whitehouse, 1994).

Esta relação entre o acabamento da superfície, sua funcionalidade, e o processo de geração da mesma é a principal razão para a medição e caracterização da superfície.

Neste trabalho pretende-se trazer soluções para a caracterização de superfícies, no ambiente de Matlab para a obtenção de parâmetros, interpretando o conjunto de pontos que definem sua superfície.

1.2 PROBLEMA

Os atuais equipamentos desenvolvidos na área de metrologia de superfícies como os sistemas de perfilometria óptica 3D sem contato por interferometria são capazes de realizar o mapeamento 3D gerando um conjunto de dados (x, y, z) em altíssima resolução, os quais devem ser processados por softwares dedicados envolvendo a filtragem e a determinação dos parâmetros de acordo com as normas ISO 4287, ISO 13565-2, ASME B46.1 conforme o caso. Todavia, esses softwares são de caráter proprietário e, de alto custo e não permitem acesso ao código fonte nem modificações para expansão e novas aplicações.

Neste contexto, a demanda de pesquisa tecnológica deste projeto envolve o desenvolvimento de um modelo computacional capaz de processar dados obtidos por perfilometria óptica 3D sem contato disponível no Laboratório de Metrologia do Departamento Acadêmico de Mecânica do Campus Curitiba da UTFPR.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GERAL

O presente projeto de pesquisa visa o estudo e o desenvolvimento de um modelo computacional em ambiente MATLAB[®] (Mathworks, 2015) capaz de calcular os principais parâmetros de textura de superfícies apresentados nas normas ISO 4287 e ISO 25178 compatível com a técnica de perfilometria óptica 3D sem contato e o equipamento disponível no Laboratório de Metrologia do DAMEC.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos da pesquisa, destacam-se os seguintes:

- Estudar os métodos de cálculos dos parâmetros de textura de superfícies 3D e selecionar os principais parâmetros de textura (p.e. *amplitude parameters* e *height parameters*) identificados nas normas ISO 4287 e ISO 25178;

- Desenvolver o modelo matemático para calcular os parâmetros de textura envolvendo as tarefas de remoção de forma e cálculo dos parâmetros;
- Estudar o ambiente e a linguagem de programação MATLAB;
- Implementar o modelo matemático dos parâmetros selecionados no ambiente MATLAB;
- Comparar os resultados do modelo obtidos com o modelo, com os dados fornecidos pelo software proprietário acoplado ao equipamento do Laboratório de Metrologia DAMEC-UTFPR.

1.4 JUSTIFICATIVA

O presente projeto de pesquisa pretende contribuir para emprego das técnicas de medição e caracterização da textura de superfícies de componentes manufaturados como forma de aprimorar as análises realizadas pelo Laboratório de Metrologia da DAMEC-UTFPR.

Adicionalmente, o projeto de pesquisa pretende disponibilizar os conhecimentos produzidos como alternativa para a caracterização uma vez que os *softwares* específicos para a medição de superfícies possuem custo elevado.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Cervo e Bervian (2002) sugerem que uma pesquisa científica pode ser classificada a partir de quatro dimensões: quanto à natureza, à forma de abordagem do problema, aos objetivos e aos procedimentos técnicos.

Inicialmente, quanto à natureza, este projeto se enquadra como pesquisa aplicada, segundo a linha de Gil (1991), pois os conhecimentos gerados são aplicáveis a problemas de cunho eminentemente prático.

Quanto à forma de abordagem do problema, esta pesquisa tem um viés quantitativo, ainda na linha de pensamento de Gil (1991), pois ela se concentra no processo de modelagem e em experimentos, e as discussões são baseadas na análise dos resultados.

Em relação ao objetivo, a pesquisa empreendida é exploratória, de acordo com a definição de Gil (1991) e do ponto de vista dos procedimentos técnicos a pesquisa será do tipo experimental.

Dentre os procedimentos metodológicos da pesquisa, destacam-se os seguintes:

- Revisão da literatura da área de metrologia de superfícies;
- Seleção de parâmetros de textura de superfície considerando a normalização técnica pertinente (normas ISO);
- Extração das coordenadas da superfície;
- Preparação do modelo matemático;
- Implementação do modelo matemático no ambiente MATLAB®;
- Verificação e Validação do modelo considerando a comparação de resultados com um padrão de referência.

O equipamento que foi utilizado no projeto é o Talysurf CCI Lite Non-contact 3D Profiler da Taylor Hobson instalado no Laboratório de Metrologia e Qualidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Ao salvar a superfície medida, suas coordenadas (x, y e z) são extraídas, em uma extensão (.txt). No MATLAB® estes dados são importados na forma de vetor para então serem manipulados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção apresentam-se os principais conceitos relacionados ao tema de pesquisa, em especial, destacam-se os parâmetros de textura de superfície de amplitude (Michigan Metrology, 2015), funcionais e os parâmetros de volume (Talymap Platinum, 2015).

A textura de uma superfície, adquirida por qualquer instrumentação metrológica, de acordo com Muralikrishnan (2009) é um conjunto de dados discretos. Isto é, a geometria nominal da superfície é expressa como uma função das coordenadas X, Y, Z. Embora as superfícies sejam de pontos contínuos, um instrumento de microscopia, por exemplo, realiza a aquisição de uma amostra de pontos finitos, como por exemplo, uma matriz 1.024×1.024 pontos ou mais.

Conforme, Digital Metrology (2014), As superfícies são compostas por "formas". Onde, separando por comprimentos de onda, as de "long wavelength shapes": são chamadas de ondulação e as de "short wavelength features": são denominadas rugosidade. E medir de superfícies envolve descrever estas formas através de números.

De modo geral, também explicado na *Digital Metrology* (2014), o termo "textura da superfície" refere-se ao perfil bruto, compreendendo rugosidade, ondulação entre outros atributos da superfície, tais como a direção das características da superfície. O termo "acabamento superficial" normalmente se refere aos aspectos "rugosidade" da superfície - ignorando a forma e subjacentes ondulação. Seja cauteloso ao lidar apenas com o "acabamento superficial", como muitos problemas funcionais estão relacionados com a ondulação também.

A medição de superfícies, explicada na *Digital Metrology* (2014), deve ser compreendida em oito etapas, mas melhor detalhadas no fluxograma abaixo:

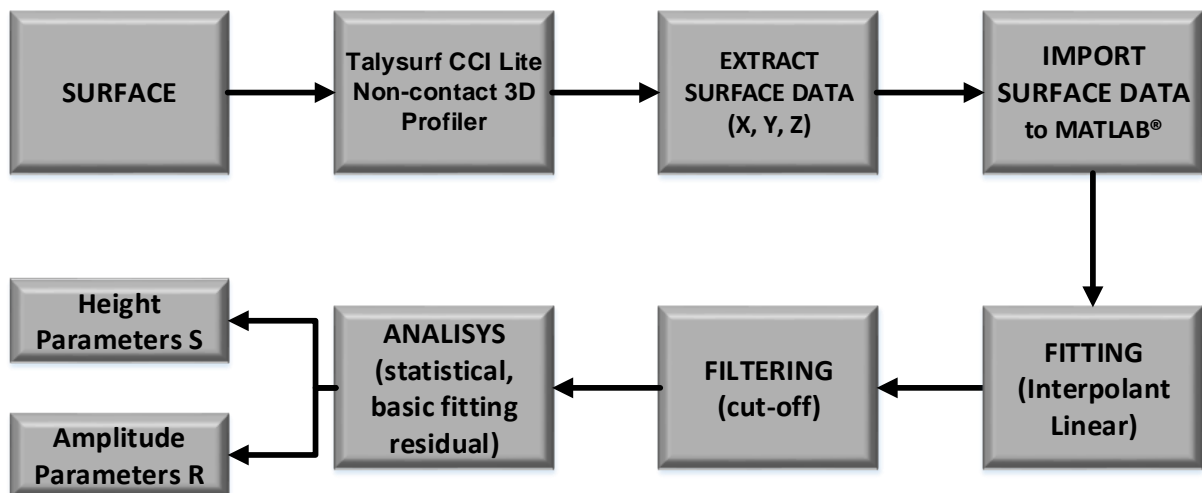


Figura 1: Fluxograma da Análise de superfícies.
Fonte: Autoria Própria.

2.1 FITTING

Ainda, definido por Muralikrishnan (2009), a matriz de pontos de uma superfície, mesmo depois de alinhada no dispositivo de medição, pode haver ainda alguma inclinação residual durante a medição da topografia. Em alguns casos, a geometria nominal pode ser curva, tal como quando se extrai um perfil a partir de

uma superfície de uma esfera ou cilindro. *Fitting* é, portanto, uma das técnicas usadas como uma etapa de "pré-processamento", para a remoção da forma subjacente, na caracterização de superfícies, como é mostrada na figura 1 a seguir.

Na etapa seguinte ao pré-processamento a superfície é submetida a uma filtragem.

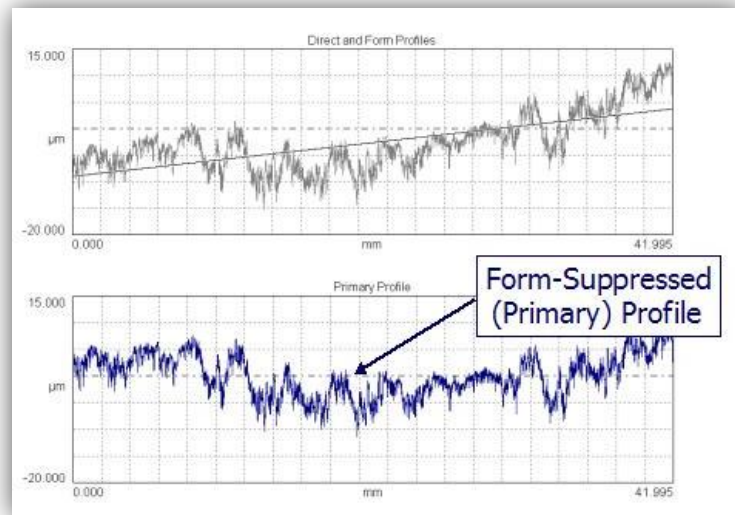


Figura 2: A etapa Fitting.
Fonte: Digital Metrology (2014).

2.2 FILTERING

Desde os primeiros estudos, as superfícies, para a engenharia, em Muralikrishnan (2009) são vistas como uma textura de rugosidade, sobrepostas a uma curvatura chamada de ondulação e desvios de longo alcance chamados forma.

A classificação se deve ao fato de que a rugosidade, ondulação, e forma têm diferentes origens e afetam a funcionalidade do componente de diferentes maneiras. (Whitehouse, 1994)

Portanto, particionar um perfil em rugosidade, ondulação, e forma é de fundamental importância na análise de textura da superfície. E esta separação é conseguida por meio de um processo chamado de filtragem.

Nesta etapa, conforme a Digital Metrology (2014), a superfície filtrada é na verdade, suavizada suprimindo comprimentos de onda ou frequências, para se reduzir os efeitos de ruídos dos dispositivos de medição e imperfeições. Essa suavização é quantificada por *cutoff's*.

No começo das medições de textura de superfície, o perfil foi filtrado graficamente (Whitehouse, 1994). O perfil bruto, o qual é composto por ondulação e rugosidade, foi dividido em segmentos de igual comprimento, e em cada um dos segmentos, uma linha média foi desenhada. O perfil de rugosidade foi obtido considerando os desvios dos pontos da linha média. A abordagem gráfica era complicada e demorada. Um modo automático para se obter o perfil tornou necessário e foi adotada a utilização de filtros elétricos para a filtragem de textura da superfície.

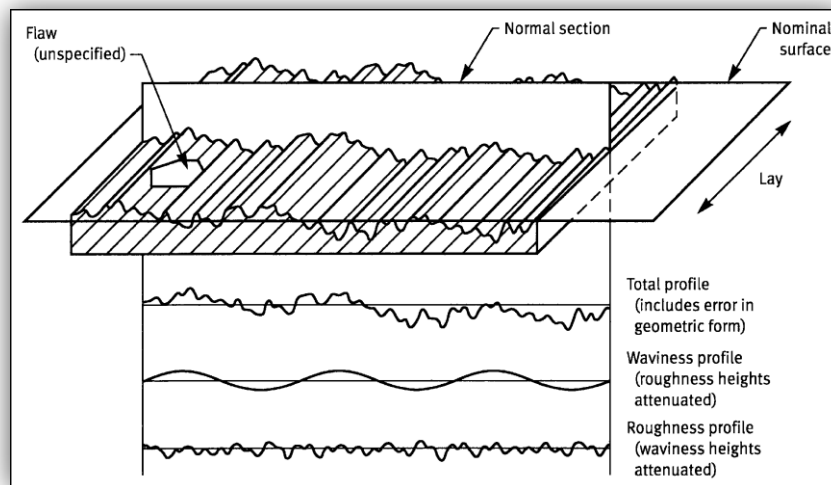


Figura 3: Surface roughness and waviness.
Fonte: B. Muralikrishnan e J. Raja (2009, p.5).

Embora existam diferentes tipos de filtragem, neste trabalho será abordado a respeito do filtro Gauss, o qual é o mais indicado pelas normas ASME e ISO, de acordo com a Digital Metrology (2014).

2.2.1 CUTOFF

De acordo com Brennan, (2010), os filtros desempenham um papel fundamental na análise de medição de textura de superfície. Isto é, um processo de extração, ou suprimir, certos comprimentos de onda ou frequências espaciais do perfil total como tentativa para se reduzir os efeitos do ruído do instrumento e imperfeições.

Os parâmetros de rugosidade de perfil têm em seu processamento uma filtragem, e valores de *cutoff's a serem definidos*. Os *cutoff's* determinam o

comprimento de amostragem e devem ser definidos conforme a tabela 1 na sequência.

Tabela 1: Valores recomendados para *Cut-off*.
Recommended Cut-off (ISO 4288-1996)

Periodic Profiles	Non-Periodic Profiles		Cut-off	Sampling Length/ Evaluation Length
	Spacing Distance RSm (mm)	Rz (μm)	Ra (μm)	λ_c (mm)
>0.013-0.04	τ_0 0.1	τ_0 0.02	0.08	0.08/0.4
>0.04-0.13	>0.1-0.5	>0.02-0.1	0.25	0.25/1.25
>0.13-0.4	>0.5-10	>0.1-2	0.8	0.8/4
>0.4-1.3	>10-50	>2-10	2.5	2.5/12.5
>1.3-4.0	>50	>10	8	8/40

Fonte: RANK P.T.O'Connor's (2009).

Para Muralikrishnan (2009), quando o *cutoff* aumenta, aumenta também seu comprimento de amostragem no perfil de rugosidade, aumentando também parâmetros de amplitude, como Ra, por exemplo, calculados sobre o perfil de rugosidade.

Também definido pela Digital Metrology (2014), a alteração do valor de *cutoff*, pode ter um enorme impacto sobre a medição da rugosidade e ondulação.

Quanto menor valor de *cutoff*, menores serão os valores de rugosidade, por outro lado, o mesmo *cutoff* pode representar um comprimento de amostragem a ser removido em um perfil de ondulação, por exemplo, resultando em um parâmetro de ondulação de menor amplitude.

A figura 4 a seguir apresenta a mesma superfície com dois valores de *cutoff's* diferentes.

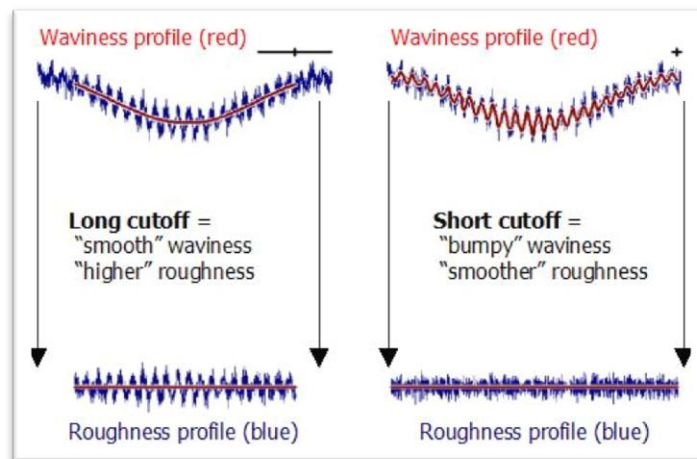


Figura 4: Exemplificando dois valores diferentes de *cutoff*.
Fonte: Digital Metrology (2014).

Existem três *cutoff's* diferentes, os aplicados para medir rugosidade, (λ_c e λ_s), para medir ondulação, (λ_{cw} e λ_{sw}), e os aplicados para medir perfis primários ou forma, (λ_f), como mostrado na figura 5, contudo, neste trabalho falaremos apenas a respeito do *cutoff*, λ_c .

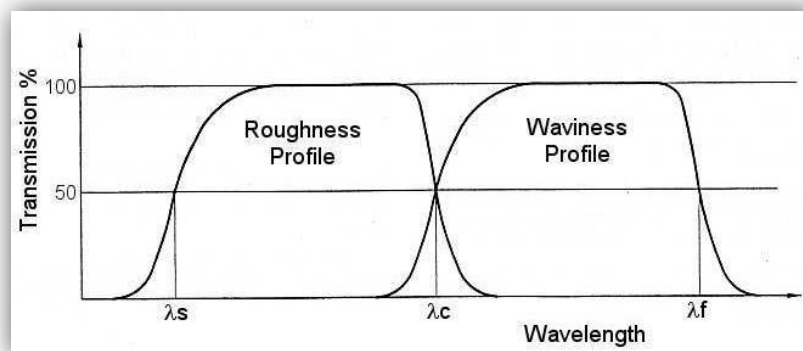


Figura 5: Gráfico com as características de transmissão de cada *cutoff*, rugosidade, ondulação e forma.
($\lambda_s = 25 \mu\text{m}$, $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$, $\lambda_{sw} = 0.8 \text{ mm}$, $\lambda_{cw} = 8 \text{ mm}$, and $\lambda_f = 8 \text{ mm}$)
Fonte: ISO 4287 (1997).

O *cutoff* fornece os elementos essenciais para definir a rugosidade.

2.3 FILTRO GAUSS

O filtro mais amplamente utilizado para a análise do perfil de superfície é o filtro de Gauss. É descrito tanto no padrão americano (American Society of Mechanical Engineers, 2002) e na norma (International Organization for

Standardization, 1996). A função ponderada (definição do filtro no domínio do tempo) de o filtro de Gauss é dada pela equação:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha\lambda c} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{\alpha\lambda c} \right)^2 \right]$$

Onde, $\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0,4697$ e $cutoff = \lambda c$. A característica de transmissão é obtida fazendo a transformada de Fourier da função $S(x)$.

2.4 TRANSFORMADA DE FOURIER

Na filtragem discutida anteriormente, sabe-se que comprimentos de onda são transmitidos e comprimentos de onda são suprimidos.

Um filtro pode ser definido, de acordo com Muralikrishnan (2009) quer no domínio do tempo ou o domínio da frequência, e as duas definições são ligadas entre si pela transformada de Fourier e pela transformada inversa de Fourier. O filtro no domínio do tempo tem uma forma diferente do filtro domínio de frequência tal como determinado pela sua transformada, e o filtro no domínio da frequência vai ter uma forma diferente do filtro no domínio do tempo, tal como determinado pela sua transformada inversa.

Neste trabalho temos o perfil no domínio do tempo e a transformada de Fourier é utilizada nesta caracterização, para passar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência.

2.5 PARÂMETROS

2.5.1 PARÂMETROS DE AMPLITUDE 3D

Descrito por Jiang (2003), os parâmetros de amplitude dependem dos desvios das alturas para se relacionar as amplitudes com as propriedades da superfície. São divididos em duas categorias: média das ordenadas e extremos de picos e vales.

Na categoria de média das ordenadas temos o parâmetro da média aritmética das alturas de picos e vales, *Average Roughness* (Sa), e o desvio padrão das alturas entre picos e vales, *Root Mean Square Roughness* (Sq).

Estes são calculados de acordo com as fórmulas:

$$Sa = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta(x_i, y_j)$$

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x_i, y_j)}$$

Os parâmetros Sa e Sq representam uma medida geral da textura da superfície. E para Michigan Metrology (2014), Sa e Sq não determinam a diferenciação de picos, vales, do espaçamento, e das várias características de textura. Assim muitas superfícies com diferentes características podem ter o mesmo Sa ou Sq . No entanto, uma vez que um tipo de superfície tenha sido determinada, os parâmetros Sa e Sq podem ser utilizados para indicar desvios significativos nas características de textura. Sq é normalmente usado para especificar superfícies ópticas e Sa é usado para as superfícies usinadas.

O parâmetro *Skewness* (Ssk), em Jiang (2013), é a medição da assimetria dos desvios da superfície em torno da linha média. E, o parâmetro *Kurtosis* (Sku) para caracterizar o “achatamento” de uma superfície.

Para uma superfície Gaussiana, e sendo simétrica a distribuição das alturas, o $Ssk=0$. E, de acordo com a Michigan Metrology (2014) um $Ssk>0$ indica a predominância de picos, já um $Ssk<0$ indica uma estrutura de vales compondo a superfície.

Também de acordo em Michigan Metrology (2014), o parâmetro $Sku>3,00$ indica a presença de picos e vales excessivamente elevados. Já ausência de picos e vales elevados tem um $Sku<3,00$. Se as alturas de superfície são distribuídas normalmente, o Ssk é de 0,00 e Sku é 3,00. Superfícies que variam gradualmente, sem picos extremos ou vale, tenderão a ter $Sku < 3,00$, como ilustra a figura 6 abaixo. Os parâmetros Ssk são úteis na especificação superfícies afiadas e no monitoramento para diferentes níveis de desgaste. Sku é útil para indicar a presença de qualquer pico ou defeitos de vale que podem ocorrer sobre uma superfície.

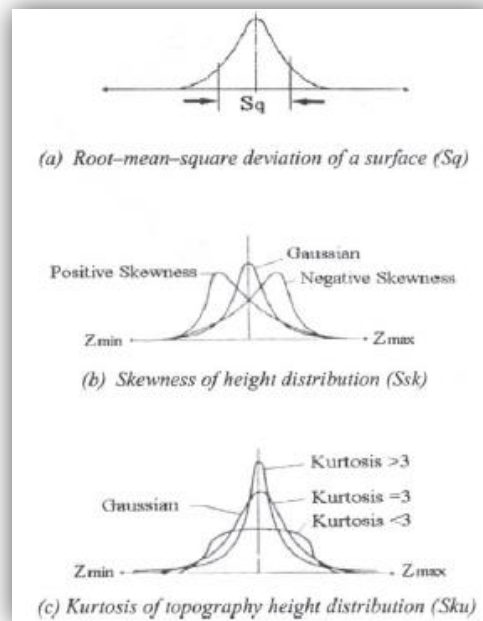


Figura 6: Distribuição das Alturas. Skewness e Kurtosis.
Fonte: Jiang (2003).

Na categoria que descreve os extremos da distribuição de altura, temos o *Maximum Surface Peak Height (Sp)*, *Lowest Valley of the Surface (Sv)*, e *Maximum Height of the Topographic Surface (Sz)*.

São obtidos respectivamente pelas fórmulas:

$$Sp = \text{MAX}(\eta p), \quad \text{with } \eta p > 0$$

$$Sv = \text{MIN}(\eta v), \quad \text{with } \eta v > 0$$

$$Sz = Sp + Sv$$

Na figura 7 a seguir, os comandos de estatística do MATLAB[®], utilizados para a obtenção destes parâmetros.

```
Sa = mean(abs(z));
Sq = std(z);
Ssk = skewness(z);
Sku = kurtosis(z);
Sp = max(z);
Sv = abs(min(z));
Sz = Sp + Sv;
```

Figura 7: Comandos do MATLAB[®].
Fonte: MATLAB[®].

2.5.2 PARÂMETROS DE AMPLITUDE 2D

Para Muralikrishnan (2009), o parâmetro *Average Roughness (Ra)*, é definido como a média aritmética dos valores absolutos da rugosidade do perfil, medidos a partir da linha média. Já o parâmetro *Root Mean Square Roughness (Rq)* é definido como a raiz quadrada da média dos valores do perfil a partir da linha média.

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r(i)|$$

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r(i)|^2}$$

O *Skewness (Rsk)* para medir a assimetria do perfil, e a *Kurtosis (Rku)* é a medida da dispersão de que caracteriza um achatamento da curva da função de distribuição de probabilidade, definidos respectivamente por:

$$Rsk = \frac{1}{n(Rq)^3} \sum_{i=1}^n r(i)^3$$

$$Rku = \frac{1}{n(Rq)^4} \sum_{i=1}^n r(i)^4$$

Os parâmetros *Maximum Profile Peak Height (Rp)*, é a distância ao pico mais alto do perfil medido a partir da linha média, o *Maximum Profile Valley Height (Rv)* é a distância até a maior profundidade, a partir da linha média, o *Maximum Height of the Profile (Rt)* é a distância entre o pico mais alto, até a maior profundidade. O parâmetro *Average maximum height of the profile (Rz)*, é definido como a média dos valores sucessivos de Rt_i calculada sobre o comprimento do perfil. Rt_i é definida como a altura máxima do perfil dentro do comprimento de amostragem.

2.6 MATLAB

Na definição encontrada em Chapman (2003), MATLAB® (que abrevia MATrix LABoratory – Laboratório de Matrizes) é um programa de computador de uso

específico, que surgiu como um programa para operações matemáticas sobre matrizes e ao longo dos anos foi otimizado para executar cálculos científicos e de engenharia.

Em seu livro, Chapman (2003), também destaca as vantagens e desvantagens do MATLAB®.

- O MATLAB® é de fácil uso e sua linguagem é ideal para o uso educacional e para o desenvolvimento de protótipos de novos programas.
- Possui plataforma independente, com suporte para muitos sistemas computacionais, podendo desta forma migrar de plataformas, conforme a necessidade do usuário.
- Existe também uma ampla gama de funções pré-definidas em sua biblioteca.
- No que diz respeito a desenhos e imagens, possui diversos comandos, e os desenhos e imagens podem ser de qualquer dispositivo gráfico suportado pelo computador onde está o MATLAB®.
- O MATLAB® possui ferramentas para que se construa uma interface gráfica.
- A compilação de seus programas se dá pela interpretação das instruções em tempo de execução, o que pode demandar tempo. Mas, o programa pode ser compilado separadamente e ser transformado num executável.

E como desvantagens:

- O fato do MATLAB® ser lento, pois ele executa seus programas interpretando a linguagem e não compilando.
- E o custo elevado de sua licença.

3 DESENVOLVIMENTO

O padrão utilizado para a caracterização foi o um padrão de rugosidade dotado de uma superfície usinada com características aleatórias do tipo anisotrópicas, ou seja, nesta superfície os parâmetros de rugosidade variam de acordo com a direção em que se executa a medição.

Foi medida a superfície no Talysurf CCI Lite Non-contact 3D Profiler da Taylor Hobson instalado no Laboratório de Metrologia e Qualidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A área mapeada foi uma área da superfície de um

padrão de referência com uma ampliação de 20x e em três resoluções diferentes: 256 x 256 pixels (195 µm x 195 µm), 512 x 512 pixels (400 µm x 400 µm) e 1024 x 1024 pixels (0,83 mm x 0,83 mm). Ao importar os dados da superfície na resolução de 1024 x 1024 pixels, o tempo de processamento para esta quantidade de pontos ficou muito alto, já na resolução de 512 x 512 pixels, ficou mais viável para o desenvolvimento e análise dos resultados.

Foram salvos os pontos desta superfície no Tallymap[®], e importados para o MATLAB[®], como vetores também nomeados como vetores x, y e z, conforme mostra figura 8 a seguir.

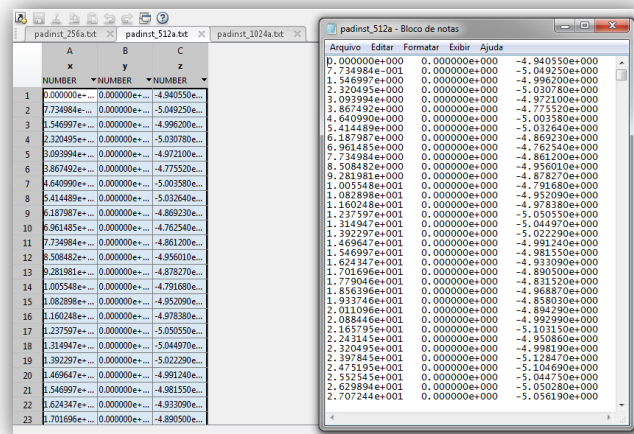


Figura 8: Importação dos dados da superfície para o MATLAB[®].
Fonte: Autoria Própria.

Com estes dados da superfície importados, foi utilizado o comando “Prepare Surface Data”, que prepara os vetores de entrada, se necessário, para o *fitting*, como na figura 9.

```
[X, Y, Z] = prepareSurfaceData(x, y, z);
```

Figura 9: Comando Prepare Surface Data
Fonte: MATLAB[®].

Este comando transforma os vetores em matrizes do mesmo tamanho que z. Retorna os dados como colunas, independentemente das formas de entrada. Avisa como erro se os números de elementos não coincidem e se os números de elementos correspondentes são de tamanhos diferentes. Este comando também converte número complexo para real, (remove as partes imaginárias) e alerta sobre esta conversão. Remove NaN ou Inf dos dados e alerta sobre esta remoção e

converte os *nondouble* para *double* e alerta sobre esta conversão. Neste trabalho a remoção dos *NaN* faz referência aos pontos não medidos pelo perfilômetro.

Na sequência, o comando *table* utilizado para organizar os dados em tabela, para aplicar o comando *fit*, com a opção de *Linear Interpolation* usada para plotar a superfície, como mostra a figura 10 e 11.

```
T = table(X,Y,Z);
f = fit([T.X, T.Y],T.Z,'linearinterp');
```

Figura 10: Comando Table e Fit.
Fonte: MATLAB®

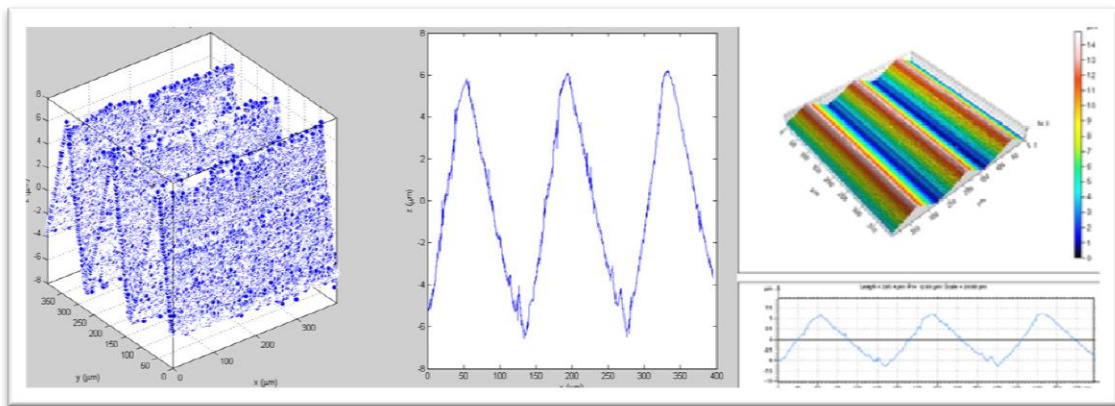


Figura 11: Superfície Plotada e Perfil.
Fonte: MATLAB® e Talymap®

Com o perfil plotado, através da ferramenta *Basic Fitting*, se obteve os resíduos do perfil, mostrado na figura 12, através do qual, resultou nos valores de *Amplitude parameters - Roughness profile*.

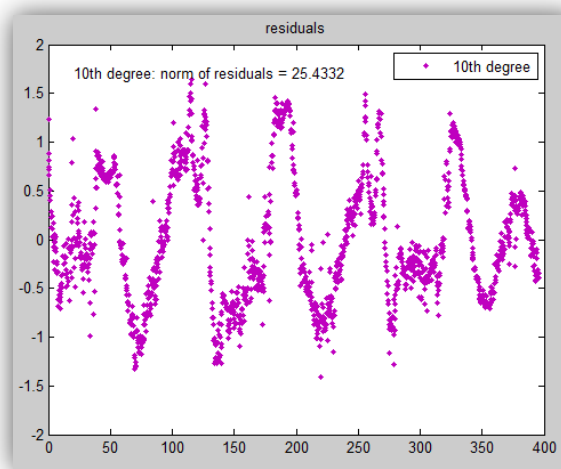


Figura 12: Resíduos do Perfil.
Fonte: MATLAB®

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros foram calculados com os dados discretos, extraídos pelo *Talysurf CCI Lite Non-contact 3D Profiler*. Os parâmetros de amplitude, conduzidos pela norma ISO 25178 foram abordados pelo MATLAB®, de acordo com suas próprias definições, através de seus comandos estatísticos. O parâmetro *Average Roughness (Sa)*, foi obtido pela média dos valores absolutos das alturas (z), por sua vez, o parâmetro *Root Mean Square Roughness (Sq)*, foi obtido calculando o desvio padrão das alturas (z).

O parâmetro *Skewness (Ssk)*, e o *Kurtosis (Sku)* foram obtidos diretamente aplicando os comandos *skewness* e *kurtosis* para as alturas (z). Os parâmetros *Maximum Surface Peak Height (Sp)*, *Lowest Valley of the Surface (Sv)*, e *Maximum Height of the Topographic Surface (Sz)* foram encontrados respectivamente com o máximo, mínimo e a soma das alturas (z).

Para os parâmetros de altura, conduzidos pela norma ISO 4287, através da ferramenta *Basic Fitting*, aplicada ao gráfico de perfil, considerando uma polinomial de 10°, foi possível extrair os resíduos do gráfico de perfil. Conforme a figura 13 na sequência.

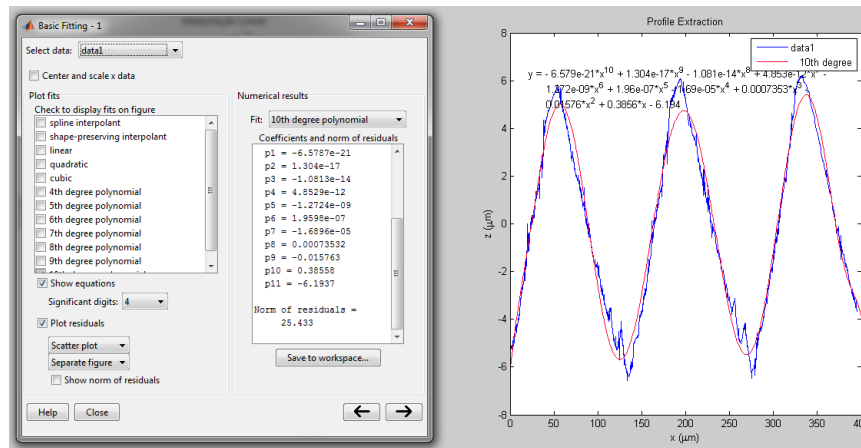


Figura 13: Basic Fitting aplicado ao perfil
Fonte: MATLAB®

Foi então calculado o parâmetro *Average Roughness (Ra)*, fazendo a somatória dos valores absolutos dos resíduos dividido pelo comprimento do perfil. O parâmetro *Root Mean Square Roughness (Rq)*, foi obtido pela raiz quadrada da somatória do quadrado dos resíduos dividido também pelo comprimento do perfil. O *Skewness (Rsk)* foi obtido fazendo o parâmetro *Root Mean Square Roughness (Rq)*

elevado ao cubo multiplicado pela somatória dos resíduos elevados ao cubo, e o parâmetro *Kurtosis* (Rku) foi obtido fazendo o parâmetro *Root Mean Square Roughness* (Rq) elevado ao a quarta multiplicado pela somatória dos resíduos elevados também a quarta.

Já os parâmetros *Maximum Profile Peak Height* (Rp), *Maximum Profile Valley Height* (Rv) o *Maximum Height of the Profile* (Rt) e *Average maximum height of the profile* (Rz), são respectivamente calculados computando o máximo, do valor dos resíduos, o mínimo dos valores absolutos dos resíduos e o valor total compreendendo os parâmetros Rp e Rv .

Na figura 14 abaixo, o resultado do processamento no ambiente MATLAB®, extraído do *Workspace*

Name ▲	Value	Min	Max
F	1536x1 double	-1.4129	1.6416
Ra	0.5411	0.5411	0.5411
Rp	1.6416	1.6416	1.6416
Rq	0.6489	0.6489	0.6489
Rt	3.0545	3.0545	3.0545
Rv	1.4129	1.4129	1.4129
Sa	3.2218	3.2218	3.2218
Sku	1.7959	1.7959	1.7959
Sp	7.4068	7.4068	7.4068
Sq	3.7156	3.7156	3.7156
Ssk	0.0933	0.0933	0.0933
Sv	7.4751	7.4751	7.4751
Sz	14.8819	14.8819	14.8819
X	262144x1 double	0	395.2577
Y	262144x1 double	0	395.4473
Z	262144x1 double	-7.4751	7.4068
ans	1.6416	1.6416	1.6416
f	1x1 sfit		
fit	1x1 struct		
i	262144	262144	262144
n	1536	1536	1536
normre...	25.4332	25.4332	25.4332
resids	1536x1 double	-1.4129	1.6416
s	1x1536 double	-6.5787	6.2210
u	1537	1537	1537
v	1x1536 double	0	395.4473
x	262144x1 double	0	395.2577
y	262144x1 double	0	395.4473
z	262144x1 double	-7.4751	7.4068

Figura 14: Resultado obtido ao processamento de alguns parâmetros.
Fonte: MATLAB®

Para *Height Parameters Roughness Surface*, descritos na tabela 2, no MATLAB® os parâmetros calculados pelo modelo não apresentara diferenças em relação aos valores calculados pelo Talymap®.

Entretanto, os valores de *Amplitude Parameters Roughness Profile*, descritos na tabela 3, apresentaram diferenças que podem ser explicadas em função do cutoff onde, para o padrão utilizado para caracterização neste trabalho, com o valor do parâmetro Ra igual a 3,26 µm, de acordo com a tabela 1 da página 19, o valor de cutoff que deveria ser adotado, é de 2,5 mm. Mas na resolução de 512 x 512 pixels adotados no modelo, sendo o comprimento de amostragem de 0,4 mm, o cutoff adotado foi de 0,08 mm, portanto os valores dos parâmetros também ficaram reduzidos.

Tabela 2: Resultados dos Parâmetros de superfície obtidos através do Talymap e MATLAB.

Height Parameters – Roughness Surface		
	Talymap (µm)	MATLAB (µm)
Sq	3,716	3,7156
Ssk	0,09335	0,0933
Sku	1,796	1,7959
Sp	7,407	7,4068
Sv	7,475	7,4751
Sz	14,88	14,8819
Sa	3,222	3,2218

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3: Resultados dos Parâmetros de Perfil obtidos através do Talymap e MATLAB.

Amplitude Parameters - Roughness Profile		
	Talymap (µm)	MATLAB (µm)
Rp	1,586	1,6416
Rv	1,742	1,4129
Rz	3,328	3,2832
Rt	4,183	3,0545
Ra	0,6984	0,5411
Rq	0,8863	0,6489

Fonte: Autoria Própria

5 CONCLUSÕES

O presente projeto de pesquisa apresentou o estudo e o desenvolvimento de um modelo computacional em ambiente MATLAB® (*Mathworks*, 2015) destinado a calcular os principais parâmetros de textura de superfícies apresentados nas normas ISO 4287 e ISO 25178 compatível com a técnica de perfilometria óptica 3D sem

contato e o equipamento disponível no Laboratório de Metrologia do DAMEC, entre os quais se podem citar os parâmetros de amplitude e de altura (*amplitude parameters e height parameters*): *Average Roughness (Sa)*, *Root Mean Square Roughness (Sq)*, *Skewness (Ssk)*, *Kurtosis (Sku)*, *Maximum Surface Peak Height (Sp)*, *Lowest Valley of the Surface (Sv)*, e *Maximum Height of the Topographic Surface (Sz)*, para 3D e *Average Roughness (Ra)*, *Root Mean Square Roughness (Rq)*, *Skewness (Rsk)*, *Kurtosis (Rku)*, *Maximum Profile Peak Height (Rp)*, *Maximum Profile Valley Height (Rv)*, *Maximum Height of the Profile (Rt)*, *Average maximum height of the profile (Rz)* para 2D.

O modelo desenvolvido compreendeu as seguintes etapas: a extração dos dados da superfície com o uso do perfilômetro óptico Taylor Hobson marca Talysurf CCI Lite 3D sem contato. Em seguida, os dados foram importados para o ambiente MATLAB® na forma de vetores (x, y, z) codificados em um arquivo no formato (.txt). Após a importação dos dados foram realizadas as operações de ajuste (*fitting*) e filtragem (*filtering*) e, por fim, realizados os cálculos para determinação dos parâmetros.

É importante destacar que os cálculos dos parâmetros foram implementados de acordo com as normas ISO 4287 e ISO 25178 e empregando a análises estatísticas e a técnica de análise dos resíduos para o perfil 2D. E para testar o modelo foram realizados os testes comparativos entre os resultados obtidos com o modelo e os resultados pelo software *Talymap* da *DigitalSurf* do próprio equipamento.

Neste sentido, os parâmetros de altura 3D (*height parameters*) não apresentaram diferenças, demonstrando a aplicabilidade do modelo.

Por outro lado, com relação aos parâmetros 2D, as diferenças decorrentes do valor de cutoff requerem um estudo mais aprofundado para modelos de filtragem que adotam o cutoff, onde se tem um comprimento de amostragem reduzido.

Com este trabalho pode-se verificar que o estudo dos dados de uma superfície mediante o MATLAB®, torna flexível a análise podendo ir além dos resultados padronizados que se obtém hoje pelo *Talymap*®, deixando a caracterização de superfícies independente de qualquer *software* de medição já existente permitindo análises específicas, de acordo com cada projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT **NBR ISO 4287**: 2002. Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASME **B46.1** - Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay): An American National Standard; New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009.

CERVO, A.; BERVIAN, P. **Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002. 242 p.

CHAPMAN, S. J. **Programação em MATLAB para Engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Thomson, 2002. 477 p.

DIGITAL METROLOGY Disponível em: <<http://digitalmetrology.com/3-steps-understanding-surface-texture/>> Acesso em: 26 Março 2016.

DIN 4760: Desvios de forma: conceitos e sistema de classificação (1982).

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

ISO/TS CD 25178-2: 2006 Geometrical product specification (GPS) - surface texture: areal - part 2: terms, definitions and surface texture parameters.

ISO/TS CD 25178-3: 2006 Geometrical product specification (GPS) - surface texture: areal - part 3: specification operators.

JIANG, X., SCOTT, P. J., WHITEHOUSE, D. J., BLUNT, L. 2007. **“Paradigm shifts in surface metrology.” Part II**. Proceedings of Royal Society A, September 8, 2007, 463, p. 2071-2099; doi:10.1098/rspa.2007.1873 1471-2946, 2007.

JIANG, X., SCOTT, P. J., WHITEHOUSE, D. J., BLUNT, L. 2007. **“Paradigm shifts in surface metrology” Part I**. Historical philosophy. Proceedings of Royal Society A, September 8, 2007, 463 2085, p. 2049-2070; doi:10.1098/rspa.2007.1874 1471-2946.

LEACH, Richard. **Characterisation of Areal Surface Texture** - Editor. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013a.

LEACH, Richard. **Introduction to Surface Topography. In: Characterisation of Areal Surface Texture** - Editor. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013b.

MATHWORKS Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acesso em: 26 Março 2016.

MICHIGAN METROLOGY SURFACE TEXTURE PARAMETERS GLOSSARY Disponível em: <http://www.michmet.com/texture_parameters_index_by_name.html>

RANK P.T.O'Connor's Disponível em
<<http://www.oconnors.co.th/instrument/technology-roughness2.html>> Acesso em 27
Março 2016.

THOMAS, T. R. **Rough surfaces**. Longman, London & New York, 1982, pp. 47-52.

TalyMap Platinum By Digital Surf, Version: 6.1.6001 England, 2011/06/07.

WCE 2010, June 30 - July 2, 2010. London, U.K.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Estudo da superfície no MATLAB®

```

load('padinst_512a')

x=x;
y=y;
z=z;

[X, Y, Z] = prepareSurfaceData(x,y,z);

% Fitting
T = table(X,Y,Z);
f = fit([T.X, T.Y],T.Z,'linearinterp');
subplot(1,3,1), plot( f, [T.X, T.Y],T.Z );
title('Interpolação Linear');
xlabel('x (\mum)');
ylabel('y (\mum)');
zlabel('z (\mum)');

% extract profile
u = 1; %define um contador auxiliar
for i = 1:length(T.Y);
if T.X(i)>199 && T.X(i)<201; % pega valores de uma mesma linha
em Y, caso não sejam criadas as matrizes s e v, tentar mudar o
valor do intervalo;
s(u)=T.Z(i); % atribui a cada ponto da altura Z, da linha Y
para um vetor S
v(u)=T.Y(i); % atribui a cada ponto X correspondente a altura
Z para um vetor V
u = u+1;
end;
end;
% Extract Profile adaptado do desenvolvimento do aluno Diego
de Andrade Carrilo

subplot(1,3,2), plot(v,s,'b');
title('Profile Extraction');
xlabel('x (\mum)');
ylabel('z (\mum)');

%Gauss Filter
lambdac = 80; %cutoff em micrometro

```

```

alpha = 0.4697;
S=(1/(alpha*lambdac)).*exp(-pi*(v/(alpha*lambdac)).^2); %
generate the Gaussian filter
Sf=fft(S);
W=real(Sf); % extract the real part of ifft (ondulação)
Zf=ifft(W);
F=W.*s;

subplot(1,3,3), plot(v,F,'g');%(X,Z,'r'),v,s,'r'

Sa = mean(abs(z));
Sq = std(z);
Ssk = skewness(z);
Sku = kurtosis(z);
Sp = max(z);
Sv = abs(min(z));
Sz = Sp + Sv;

T = reshape(s,1536,1)
n = size(T,1); % determine length of profile r
Ra = sum(abs(resids))/n; % compute Ra
Rq = sqrt(sum(resids.^2)/n); % compute Rq
Rp = max(resids); % compute Rp
Rv = abs(min(resids)); % compute Rv
Rt = Rp + abs(Rv); % compute Rt

```