

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**CONTROLE DE QUALIDADE SUPERFICIAL DE DISCOS PARA ENSAIOS
TRIBOLÓGICOS**

por

Eduardo Bahmed

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021.

Eduardo Bahmed

CONTROLE DE QUALIDADE SUPERFICIAL DE DISCOS PARA ENSAIOS
TRIBOLÓGICOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte/Processos de Fabricação/Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Coorientador: Eng. Jean Carlos Poletto

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof^a. Heraldo José de Amorim

Prof./Prof^a. Ney Francisco Ferreira

Prof./Prof^a. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, maio de 2021

Bahmed, Eduardo
CONTROLE DE QUALIDADE SUPERFICIAL DE DISCOS PARA
ENSAIOS TRIBOLÓGICOS / Eduardo Bahmed. -- 2021.
27 f.
Orientador: Ney Ferreira.

Coorientador: Jean Poletto.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Rugosidade. 2. Parâmetros de Rugosidade. 3.
Acabamento Superficial. 4. Tribologia. I. Ferreira,
Ney, orient. II. Poletto, Jean, coorient. III.
Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Josiane e Nagib, que sempre fizeram de tudo para que eu tivesse uma boa educação. Obrigado por todo sacrifício, pelo apoio e suporte.

Ao meu irmão Gustavo, por tentar me ajudar em todos os momentos que preciso, se fazendo presente e em diversos momentos de dificuldade.

À minha namorada Giovanna, por todos os anos de paciência, por todo o apoio dado, por todas as risadas, por todos os momentos felizes juntos.

Aos meus colegas e amigos da faculdade que juntos, nos desenvolvemos e crescemos durante o curso.

Ao professor Ney, pelo empenho na orientação, pela dedicação e pela disponibilidade de auxiliar e acompanhar todos os momentos ao longo do trabalho.

Ao Jean Poletto, pela dedicação e paciência ao me ensinar e me auxiliar no desenvolvimento.

Aos bolsistas do LATRIB pela dedicação e auxílio na execução da preparação das amostras.

Ao pessoal do LAMEF pelo material disponibilizado.

Bahmed, Eduardo. **Controle de Qualidade Superficial de Discos para Ensaios Tribológicos**. 2021. 27p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

O controle da rugosidade é um fator importante em ensaios tribológicos com lubrificação. O objetivo desse trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para preparação superficial de corpos de prova a serem utilizados em tribômetro. Para isso, foram realizadas medições da rugosidade dos discos avaliados. Inicialmente os discos foram avaliados com acabamento superficial retificado, onde foi verificada diferença de valores de rugosidade conforme a orientação da medição realizada. Em seguida, diversas amostras foram preparadas em diferentes acabamentos, sendo eles polimento e lixamento em duas granulometrias: 600 e 1200. A partir dos resultados obtidos, foram avaliados diferentes parâmetros de rugosidade: rugosidade média (R_a), rugosidade média quadrática (R_q), assimetria (R_{sk}) e curtose (R_{ku}). Em comparação com R_a , rugosidade média quadrática (R_q) se mostrou mais adequada como um parâmetro de amplitude para a quantificação da rugosidade. Também foi verificada a necessidade dos parâmetros estatísticos R_{sk} e R_{ku} para uma avaliação completa dos perfis de rugosidade. Com eles, foi possível identificar variações entre as distribuições dos perfis de diferentes acabamentos superficiais, mesmo que possuindo valores de R_q semelhantes. Por fim, foi constatado que o processo de acabamento superficial da lixa 1200 é o mais indicado para a preparação de amostras utilizadas em ensaios lubrificados em tribômetros.

PALAVRAS-CHAVE: Rugosidade, parâmetros de rugosidade, acabamento superficial, tribologia.

Bahmed, Eduardo. **Surface Quality Control of Discs for Tribological Tests**. 2021. 27p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

Roughness control is an important factor in lubricated tribological tests. The main objective of this work is to develop a methodology for surface preparation of samples to be used in tribometer. Measurements were made of the roughness of the obtained discs. Initially, the discs were evaluated in a rectified surface finish, where the difference in roughness values was verified according to the direction of the measurement. Then, several discs were prepared in different finishes, being polishing and sanding in two granulometries: 600 and 1200. From the results obtained, different roughness parameters were analyzed: Arithmetic average height (R_a), Root mean square roughness (R_q), skewness (R_{sk}) and kurtosis (R_{ku}). In comparison with R_a , the mean square roughness (R_q) proved to be more suitable as an amplitude parameter for the quantification of roughness. It was also verified the need for the statistical parameters R_{sk} and R_{ku} for a complete evaluation of the roughness profiles. With the statistical parameters, it was possible to identify variations between the profile distributions of different surface finishes, even if they have similar R_q values. Finally, it was found that the surface finishing process of sanding with sandpaper 1200 is the most suitable for the preparation of used in lubricated tests in tribometers.

KEYWORDS: Roughness, roughness parameters, surface finishing, tribology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Parâmetros da Rugosidade	2
3.2. Rugosidade em Ensaios Lubrificados	3
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
5.1. Distribuição do Perfil e Diferença Entre a Orientação de Medição	8
5.2. Anomalias Verificadas nas Medições	10
5.3. Comparação das Distribuições dos Perfis	12
5.4. Comparação entre R_a e R_q	13
6. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS.....	16
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE PERFIS DE RUGOSIDADE	17
APÊNDICE B – TABELA DE VALORES DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.....	19
APÊNDICE C – PERFIS DESCARTADOS POR ANOMALIAS	20

1. INTRODUÇÃO

A tribologia pode ser definida como o ramo da ciência e tecnologia que estuda a interação entre superfícies com movimento relativo e assuntos associados, que inclui o estudo de atrito, desgaste e lubrificação (HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P., 2017). De acordo com Sedlacek, Podgornik e Vizintin, 2008, o aumento contínuo das demandas por maior confiabilidade e eficácia das peças mecânicas e redução de perdas por atrito torna cada vez mais importante o estudo das propriedades das superfícies de contato, sendo a rugosidade uma das propriedades mais importantes. Para os autores, é importante a realização de testes tribológicos com o monitoramento do atrito e análise da rugosidade, com o intuito de aprofundar o estudo do desgaste de materiais por fricção.

O significado de rugosidade para Hutchings e Shipway, 2017, são as irregularidades em pequena escala de uma superfície. A superfície de cada material precisa ser adequada à função que exerce, principalmente no caso de superfícies para componentes deslizantes; por isso, a importância do estudo do acabamento superficial se faz necessária. Para Machado et al., 2009:

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos [...] Normalmente, ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros de fabricação. A rugosidade, por sua vez, é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada.

Conforme Accadrolli e Verney (2017), para analisar o comportamento do desgaste dos materiais, a rugosidade deve ser controlada de maneira a reproduzir as condições de aplicabilidade do material. Segundo Sedlacek, Podgornik e Vizintin, 2008, o acabamento superficial do material, isto é, a rugosidade, é considerado um parâmetro fundamental para ensaios de contato lubrificado. Ainda segundo os autores, de forma geral, o atrito é menor com menores valores de rugosidade para contato com lubrificação.

De acordo com Dowson, 1992, o aumento da rugosidade é responsável pelo aumento do coeficiente de atrito em testes de fricção com lubrificação, juntamente com a carga de contato e a velocidade aplicadas. Um dos principais recursos utilizados na linha de estudo da tribologia é a curva de Stribeck, que permite compreender como alguns fatores podem influenciar as mudanças dos regimes de lubrificação. A curva também possibilita observar como o coeficiente de atrito se comporta com a mudança de outros parâmetros de teste, como viscosidade do fluido de lubrificação, a carga aplicada no teste, a velocidade de deslizamento e a rugosidade dos materiais utilizados.

Dada a importância da rugosidade dos materiais sobre os processos tribológicos lubrificados, é fundamental que exista um controle sobre a rugosidade das superfícies dos corpos de prova antes da realização de ensaios tribológicos. O controle desta propriedade tem como propósito a padronização dos ensaios, visando uma melhor repetibilidade dos resultados, bem como maior confiabilidade na sua reprodução.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal é desenvolver uma metodologia para preparação superficial de corpos de prova a serem utilizados em um tribômetro. Os objetivos específicos são definir o processo de preparação das superfícies, descrever o procedimento e estabelecer os parâmetros de rugosidade mais adequados para o controle das amostras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, expõe-se alguns dos conceitos presentes na literatura, a fim de possibilitar uma melhor compreensão deste trabalho.

3.1. Parâmetros da Rugosidade

Segundo Machado et al., 2009, a rugosidade é afetada por um elevado número de variáveis e pode ser avaliada por diversos parâmetros, sendo eles parâmetros de amplitude, de espaço ou estatísticos. O parâmetro de amplitude para controle de processo mais utilizado atualmente - conforme Hutchings e Shipway, 2017 - é a rugosidade média (R_a), definida como o desvio médio aritmético dos valores de altura da superfície no comprimento de avaliação. O valor de R_a pode ser mensurado através da Equação 3.1 realizando o somatório em módulo de todos os N pontos de altura (Y) medidos no perfil ao longo de seu comprimento de avaliação (L). De acordo com Sedlacek, Podgornik e Vizintin, 2008, R_a mostra uma boa descrição geral das variações de altura, porém é pouco sensível a pequenas variações no perfil. A Figura 3.1 mostra um exemplo de um perfil de rugosidade.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |Y_i| \quad (3.1)$$

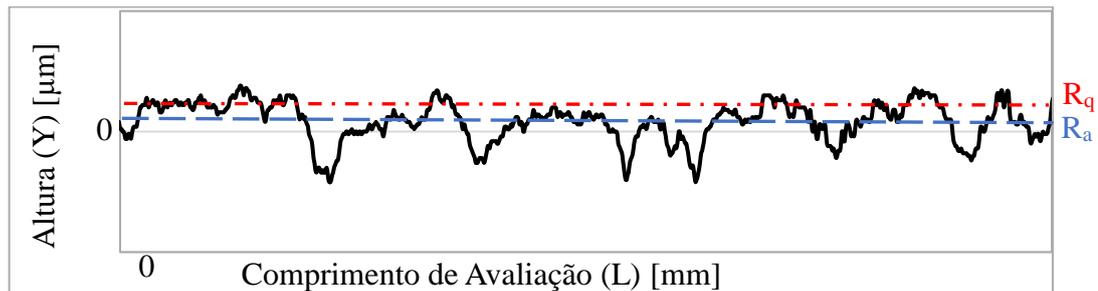


Figura 3.1 - Rugosidade descrita pela altura ao longo do comprimento, com os parâmetros R_a e R_q calculados.

Conforme Sedlacek, Podgornik e Vizintin, 2008, a rugosidade média quadrática (R_q) é mais sensível para variações de altura no perfil em comparação à R_a , pois amplifica os efeitos de vales e picos isolados em relação à linha média, evidenciando marcas ou defeitos nas superfícies. Para Machado et al., 2009, R_q representa o desvio padrão da distribuição das alturas do perfil. Para Dong, Sullivan e Stout, 1994, a rugosidade média quadrática R_q é mais significativa em estudos estatísticos que a rugosidade média R_a , já que fornece mais informações da distribuição de alturas. O valor dessa medida pode ser determinado utilizando as mesmas variáveis avaliadas na Figura 3.1 para R_a , conforme a Equação (3.2):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N Y_i^2} \quad (3.2)$$

Segundo Hutchings e Shipway, 2017, é inevitável que ao tentar descrever um perfil por um único parâmetro, algumas informações sobre a superfície serão perdidas. Para uma descrição mais completa da rugosidade, são necessárias informações sobre a distribuição de probabilidade dos pontos de altura da superfície. Portanto, parâmetros estatísticos para a rugosidade – definidos através de uma função de densidade de probabilidade - também são utilizados para análise de superfícies. O primeiro parâmetro estatístico importante a ser definido

é a assimetria do perfil (R_{sk}), que de acordo com Machado et al., 2009, indica se as irregularidades da superfície estão majoritariamente contidas em regiões de picos ou vales. Uma comparação entre dois perfis com diferentes valores de R_{sk} podem ser vistos na Figura 3.2 a seguir, que relaciona a altura do perfil em relação ao comprimento de avaliação e a distribuição do perfil ao longo dos seus valores de altura(Y).

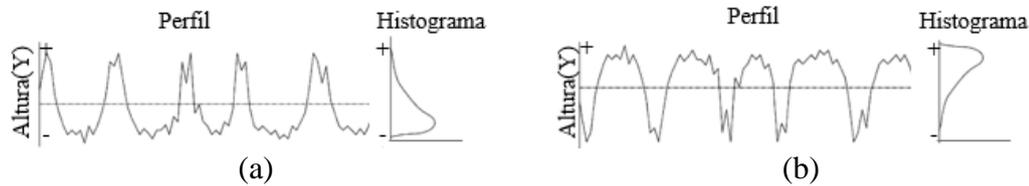


Figura 3.2 - Comparação entre perfil e distribuição acumulada: (a) assimetria positiva; (b) assimetria negativa. Fonte: Adaptado de Gadelmawla, et al., 2002.

Para Gadelmawla, et al., 2002, caso o valor de R_{sk} seja zero, significa uma distribuição simétrica entre picos e vales do perfil. Já assimetrias negativas refletem superfícies com vales mais profundos ou picos cortados, enquanto assimetrias positivas constituem superfícies com maiores picos. A assimetria do perfil, segundo Hutchings e Shipway, 2017, pode ser descrita pela Equação (3.3):

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N Y^3_i \right] \quad (3.3)$$

Além desses parâmetros descritos anteriormente, também podemos mencionar a curtose (R_{ku}), parâmetro estatístico que, conforme Machado et al., 2009, indica o achatamento da distribuição do perfil, de forma que o valor de R_{ku} para uma superfície gaussiana será próximo de 3. O R_{ku} maior que 3 indica uma superfície com uma distribuição da densidade de probabilidade mais aguda, enquanto um valor de R_{ku} menor que 3 representa uma distribuição mais dispersa ao longo do eixo de valores de rugosidade. A Figura 3.3 ilustra exemplos de perfis e distribuições com diferentes valores de curtose.

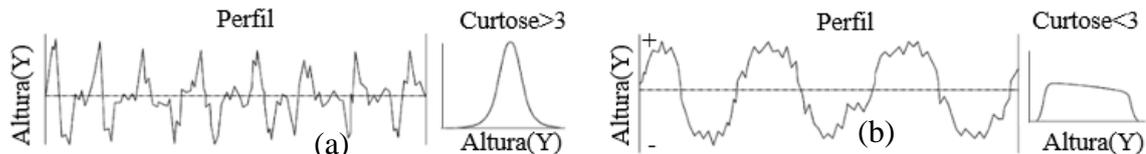


Figura 3.3 - Comparação entre perfis e suas distribuições de diferentes valores de curtose.

Fonte: adaptado de Gadelmawla, et al., 2002.

Segundo Gadelmawla, et al., 2002, a curtose descreve a acuidade da densidade de probabilidade do perfil e pode ser utilizada para diferenciar superfícies que possuem formas diferentes e o mesmo valor de R_q . Maiores valores de curtose significam uma maior concentração de pontos da distribuição próximos à sua média, enquanto menores valores representam uma maior quantidade de picos altos e vales profundos. É possível determinar o valor de R_{ku} pela Equação 3.4:

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N Y^4_i \right] \quad (3.4)$$

3.2. Rugosidade em Ensaios Lubrificados

De acordo com Accadrolli e Verney, 2017, a influência na preparação da superfície de amostras para ensaios tribológicos com lubrificação é expressiva, pois uma amostra de maior

rugosidade ocasiona um maior desgaste durante o ensaio, tornando o acabamento superficial um fator de grande relevância para este tipo de aplicação. Segundo Sedlacek, Podgornik e Vizintin, 2008, quanto mais baixa a rugosidade do material, mais baixo será o coeficiente de atrito em testes com lubrificação. Para Segu e Hwang, 2015, amostras retificadas apresentam maior coeficiente de atrito em comparação a amostras polidas, isso devido ao pior acabamento superficial e, conseqüentemente, maiores valores de rugosidade.

Para Segu e Hwang, 2015, o atrito e a rugosidade estão diretamente relacionados, devido ao regime de lubrificação alcançado durante o deslizamento. Essa relação pode ser verificada analisando a curva de Stribeck, ferramenta muito útil por ser capaz de representar graficamente os principais estágios de lubrificação em estudos de atrito. A Figura 3.4 apresenta a curva de Stribeck, onde podemos visualizar a relação do coeficiente de atrito com o fator λ ao longo das zonas de lubrificação. O fator λ é Definido por Dowson, 1992, como a razão espessura de filme lubrificante (h) pela soma de R_a das duas superfícies em deslizamento e pode ser descrito pela Equação 3.5 abaixo:

$$\lambda = \frac{h}{\sum R_a} \quad (3.5)$$

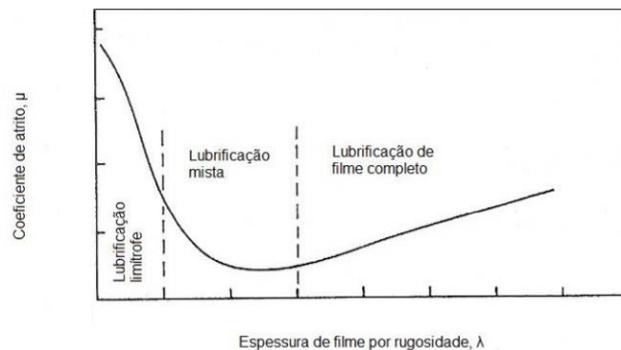


Figura 3.4 - Curva de Stribeck mostrando regimes de lubrificação e coeficiente de atrito em função da razão entre espessura de filme por rugosidade. Fonte: Adaptado de Hutchings, 2017, pág. 141.

Conforme Dowson, 1992, a curva de Stribeck pode ser identificada por três regimes de lubrificação, sendo eles: a zona de lubrificação limítrofe, mista e de filme completo. Na zona de lubrificação limítrofe o coeficiente de atrito é ocasionado devido ao contato entre as asperezas dos dois corpos de prova. Na zona de lubrificação mista ocorre a formação de filme de lubrificação, porém pouco espesso, gerando atrito em parte pelas asperezas dos corpos sólidos e em parte pelo atrito viscoso. Já na zona de lubrificação por filme completo verifica-se a formação de filme espesso o suficiente para evitar o contato das asperezas. Quando o sistema está nesta zona o atrito se deve ao cisalhamento do óleo. Quanto maior a espessura do óleo, maior o atrito. Por isso, a região de menor atrito é onde está a menor espessura de filme sem contato das asperezas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

No caso específico onde insere-se este trabalho, os corpos de prova a serem utilizados em ensaios lubrificadas em tribômetro são discos usinados e com acabamento retificado, de material aço SAE 52100. O disco possui diâmetro da face interna de 46 mm, 55 mm de diâmetro externo e altura de 12,5 mm. Foram fabricadas 30 discos, cada um deles possuindo duas faces para a realização dos ensaios. A Figura 4.1 abaixo mostra as características geométricas dos corpos de prova.

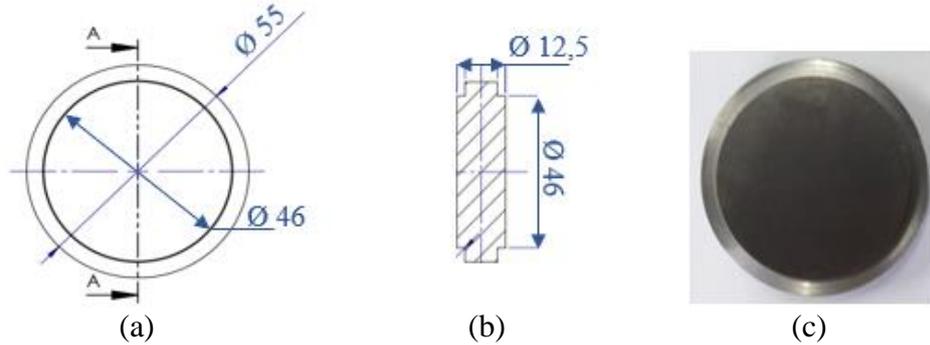


Figura 4.1 - Características geométricas do corpo de prova: (a) vista frontal contendo as dimensões [mm]; (b) vista lateral contendo as dimensões [mm]; (c) imagem da peça após ser retificada.

O processo experimental constituiu na realização de medições de rugosidade dos 30 discos retificados em suas duas faces no rugosímetro digital Mitutoyo Surftest SJ-201P (Figura 4.2). As configurações utilizadas para a medição foram um comprimento de amostragem e configuração de ondas longas (*cut-off*) de 2,5mm, comprimento de avaliação de 7,5mm, resolução de 1,5 μ m e filtro gaussiano PC50.

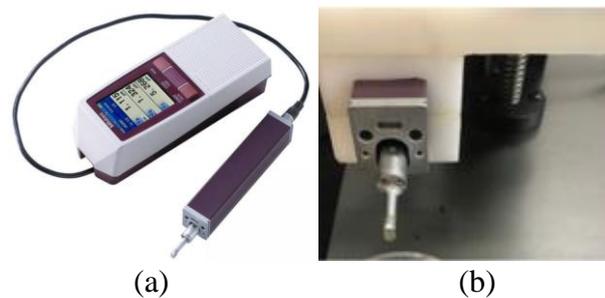


Figura 4.2 - Medição de Rugosidade: (a) Rugosímetro digital Mitutoyo Surftest SJ-201P; (b) Rugosímetro posicionado na bancada.

Foram realizadas marcações em cada face dos discos para identificar a direção em que eles foram retificados. Para todas as faces dos discos, duas medições dos parâmetros de rugosidade foram realizadas em pontos distantes em 90° de cada amostra, nas orientações longitudinal e transversal em relação às marcas da retífica. A Figura 4.3 demonstra em um desenho esquemático as direções mencionadas, onde as linhas vermelhas representam as marcas da retífica e a seta azul representa o comprimento de avaliação realizado pelo rugosímetro durante para a medição.

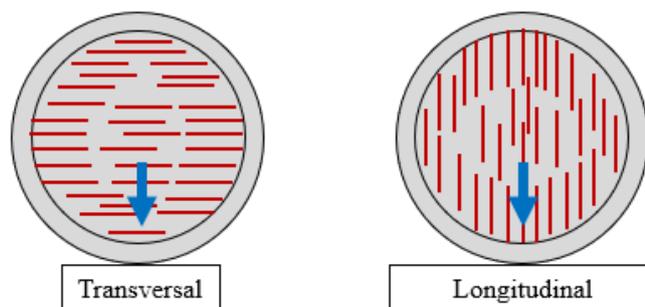


Figura 4.3 - Demonstração dos sentidos de medição: transversal (esquerda) e longitudinal (direita).

Visando a padronização da posição dos discos durante as medições de rugosidade, foi desenvolvida e fabricada uma base posicionadora, apresentada na Figura 4.4. A base consiste em um bloco de polímero fixado no sistema de medição do rugosímetro com uma furação para a disposição do disco, como ilustra a Figura 4.4(a). O posicionamento foi definido de forma que a base fique imóvel e seja possível realizar uma medição em que o centro da área avaliada fique a 15mm do centro do disco, tanto para uma medida na direção transversal das linhas do processo de retificação, como na direção longitudinal. A região de interesse foi definida por ser o raio efetivo a ser utilizado para o ensaio tribológico. O dispositivo com a base fixada pode ser visto na Figura 4.4(b) abaixo.

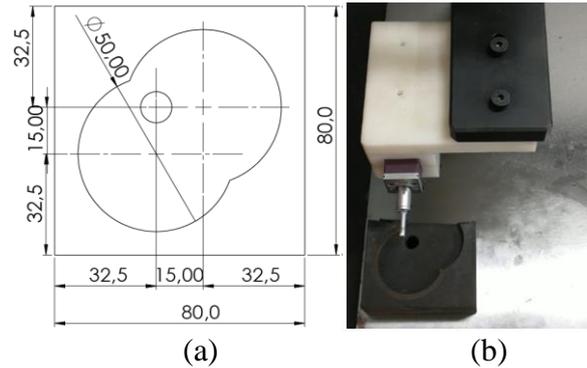


Figura 4.4 – Fixação da base para medição: (a) desenho contendo as dimensões [mm]; (b) imagem da base posicionada e fixada para as medições.

De acordo com o acima exposto, a Figura 4.5 representa as medições dos discos nas duas orientações. É possível verificar a marcação realizada na face externa do disco alinhada com o rugosímetro durante a medição na orientação longitudinal na Figura 4.5(a) e posicionada de forma ortogonal para a medição na orientação transversal na Figura 4.5(b).

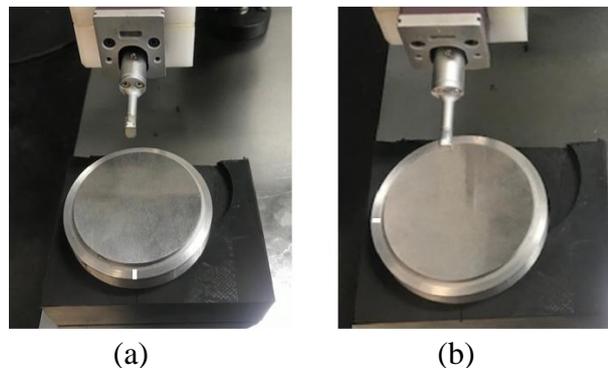


Figura 4.5 - Medição de rugosidade dos discos retificados: (a)longitudinal; (b) transversal.

A preparação das superfícies dos corpos de prova foi realizada utilizando lixas de diferentes níveis de granulometria. A técnica consistiu em lixar a face dos discos sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menores, mudando-se a direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior (no caso do primeiro lixamento até o desaparecimento dos traços da retífica). Após o lixamento, visando um acabamento superficial isento de marcas, foi realizado o polimento manual na politriz de alguns discos utilizando pasta de alumina de $1\mu\text{m}$. 29 discos passaram pelo procedimento em uma face, iniciando pela lixa granulometria de número 80 e passando para as lixas de número 360, 600, respectivamente. Depois, 15 destes discos foram lixados na granulometria de 1200 e, por fim, 6 discos foram polidos. Ao final do processo, o número de discos de acabamento nas lixas de granulometria 600, 1200 e do polimento são respectivamente 14, 9 e 6, conforme mostra a Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 - Número de peças para cada acabamento superficial.

Acabamento	Lixa 600	Lixa 1200	Polimento
Número de discos	14	9	6

Em seguida foram realizadas novas medições de rugosidade de todas as faces com o novo acabamento. A Figura 4.6 identifica a medição da rugosidade em um disco com o novo acabamento superficial após o processo de polimento.



Figura 4.6 - Medição de rugosidade na orientação transversal em um disco após o processo de polimento.

Os dados utilizados para a avaliação das novas medidas foram a rugosidade média quadrática (R_q), a assimetria (R_{sk}) e a curtose (R_{ku}). Também foram comparados os valores de R_q e R_a (medida mais comumente utilizada), a fim de demonstrar relação entre os parâmetros e validar a utilização de R_q como medida para análises da rugosidade média de corpos de prova.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da metodologia previamente proposta resultou na medição de valores de rugosidade média quadrática para os quatro tipos de acabamento superficial dos discos em ambas as orientações de medição propostas. O valor médio desses resultados, bem como o desvio padrão, tanto para as direções longitudinal e transversal, quanto geral, junto com o número de amostras e o tempo de preparo de cada processo podem ser vistos na Tabela 5.1 especificados abaixo.

Tabela 5.1 Valores médios de R_q e seu desvio padrão para os diferentes processos de acabamento superficial.

	Discos Retificados	Lixa 600	Lixa 1200	Polimento
Número de Peças Medidas	60	14	7	5
Tempo de Preparo [minutos]	-	20	25	55
R_q Médio Longitudinal [μm]	0,749	0,161	0,067	0,112
R_q Médio Transversal [μm]	1,385	0,141	0,061	0,086
R_q Médio Geral [μm]	1,067	0,151	0,064	0,099
Desvio Padrão R_q Longitudinal	0,178	0,075	0,023	0,067
Desvio Padrão R_q Transversal	0,366	0,102	0,017	0,055
Desvio Padrão Geral	0,24	0,067	0,035	0,06

Em uma análise inicial dos valores médios de R_q e seus respectivos desvios padrão, é possível verificar uma diferença considerável de valores na comparação das direções longitudinal e transversal para os discos retificados, devido a esse acabamento superficial ainda ser considerado grosseiro para a aplicação proposta. Essa variação de medida em relação à orientação não é verificada a partir do acabamento superficial da lixa de granulometria 600. O gráfico abaixo (Figura 5.1) ilustra esse comparativo, onde as colunas e suas barras de erro demonstram os valores médios da rugosidade média quadrática e seu desvio padrão, respectivamente.

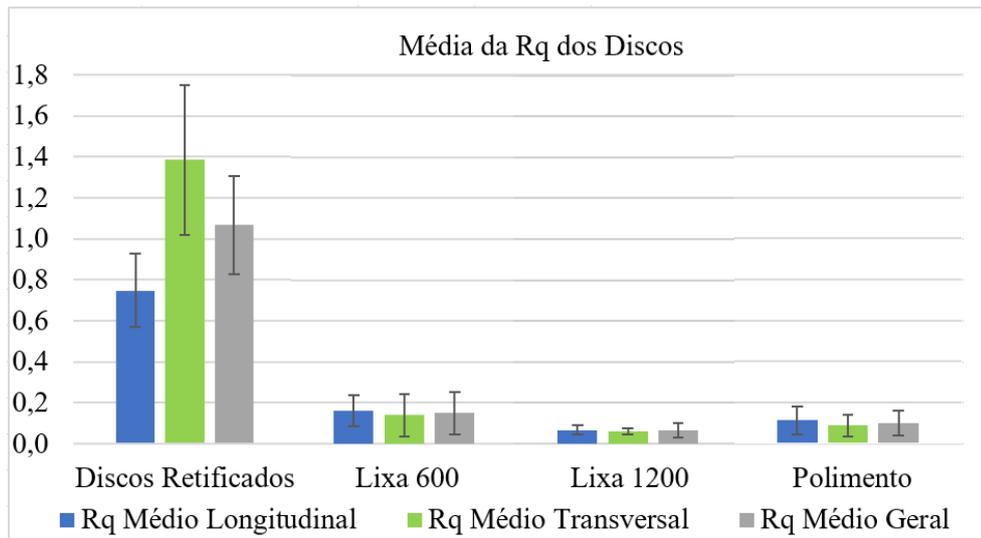


Figura 5.1 - Valores médios de R_q (colunas) e seu desvio padrão (barra de erro) para os diferentes processos de acabamento superficial.

5.1. Distribuição do Perfil e Diferença Entre a Orientação de Medição

Ao comparar as distribuições acumuladas das duas orientações - longitudinal e transversal - medidas nos discos retificados, fica claro que a direção da medição é extremamente relevante para o valor de rugosidade nesse tipo de acabamento superficial. A Figura 5.2 elucida a comparação entre as duas curvas de distribuição da densidade de probabilidade do perfil pelos valores de rugosidade, e manifesta uma expressiva desigualdade das duas distribuições.

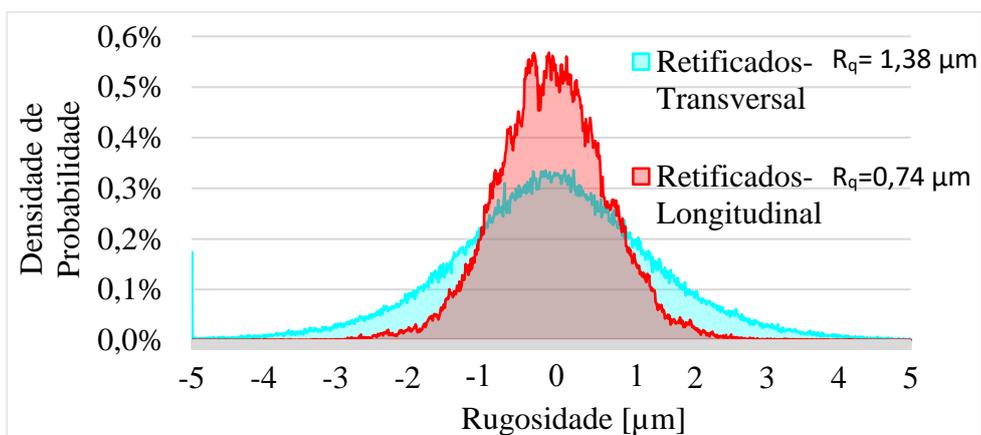


Figura 5.2 - Gráfico de densidade de probabilidade pelo valor de rugosidade para os discos retificados nas orientações transversal(azul) e longitudinal(vermelho).

Contrapondo os perfis ao longo do eixo de medição, fica nítida a diferença entre seus comportamentos, sendo o perfil transversal mais bem definido em relação ao perfil longitudinal. Isso ocorre porque a medição transversal atravessa ortogonalmente as marcas da retífica, enquanto a medição longitudinal depende do alinhamento do rugosímetro com os traços da retificação. A Figura 5.3 abaixo ilustra a comparação entre os dois perfis medidos em um corpo de prova. Outros exemplos de perfis são comparados no apêndice A.

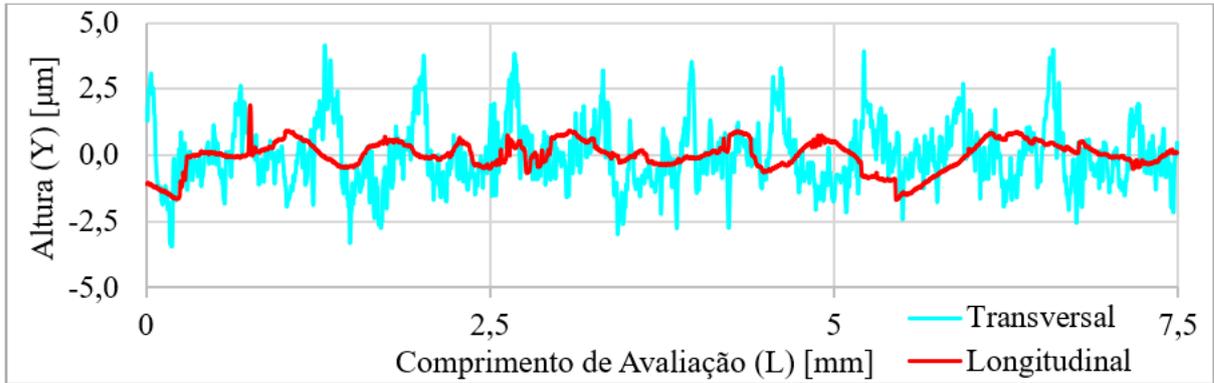


Figura 5.3 - Disco retificado 5-B: Comparação entre perfil transversal(azul) e longitudinal(vermelho)

Analisando o gráfico da densidade de probabilidade da Figura 5.2, percebe-se que distribuição transversal se mostra mais “achatada”, ou seja, possui frequência maior de picos e vales ao longo de seu perfil avaliado, enquanto a distribuição longitudinal apresenta uma menor frequência e uma maior quantidade de valores próximos à linha média de rugosidade. Também é possível verificar a diferença de alturas avaliadas no perfil ao realizar a comparação dos perfis em suas diferentes orientações na Figura 5.3. Durante o ensaio, o pino fará contato com o disco em um raio de 15mm, nesse trajeto ocorrerá uma transição de valores de rugosidade entre transversal e longitudinal. Portanto, além dos altos valores de R_q , o disco retificado apresentará oscilações nos valores rugosidade em um ensaio, não sendo recomendado esse acabamento superficial para esta aplicação.

Realizando a mesma comparação das distribuições acumuladas nas duas orientações propostas, desta vez para os discos com acabamento superficial da lixa 600, baseando-se nos valores apresentados na Figura 5.1, a direção de medição já não demonstra ser relevante para os valores de R_q das amostras. Pode-se perceber na Figura 5.4, porém, que as distribuições acumuladas em uma escala ampliada de ambas as orientações ainda apresentam uma pequena diferença entre as duas curvas.

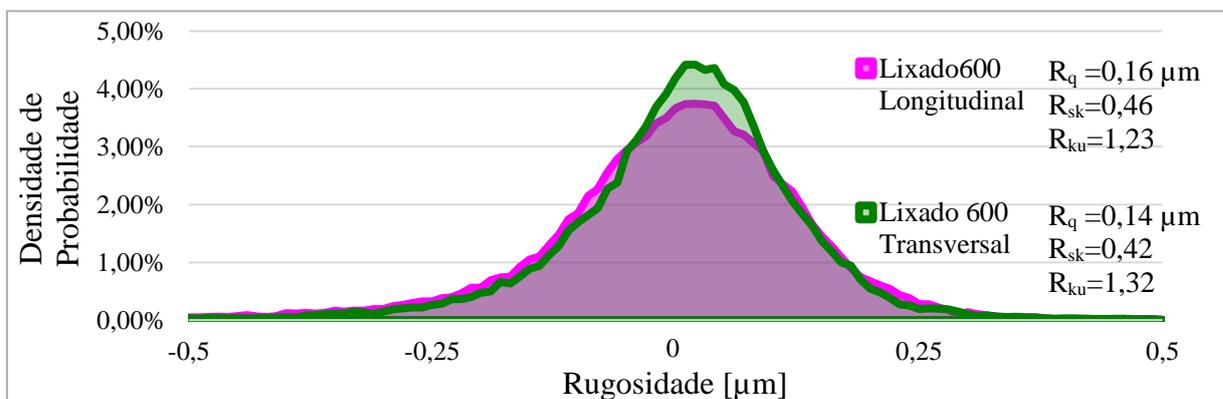


Figura 5.4 - Gráfico de densidade de probabilidade pelo valor de rugosidade para os discos na lixa 600 nas orientações transversal(verde) e longitudinal(rosa).

Ao avaliar o comportamento dos perfis longitudinal e transversal, é perceptível uma diferença de padrões, como frequência de oscilações e número de picos e vales ao longo do eixo avaliado, mesmo que os valores médios sejam semelhantes. A Figura 5.5 demonstra essa disparidade com um exemplo de superposição dos perfis medidos em uma mesma face do disco.

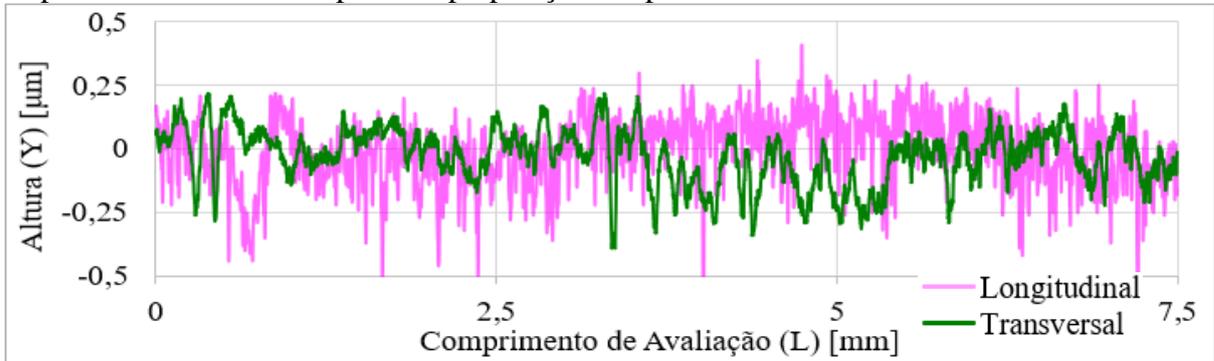


Figura 5.5 - lixa 600. Disco 13-A: Comparação entre perfil transversal(verde) e longitudinal(rosa).

Visto que os perfis em questão mostram padrões diferentes, a lixa 600 não se mostra refinada o suficiente para remover por completo as variações de perfil de acordo com a orientação da medição. Porém, as informações de amplitude e valores de rugosidade média (R_a) e rugosidade média quadrática (R_q) se mantêm similares. Além das informações de amplitude, os parâmetros estatísticos R_{sk} e R_{ku} nas distribuições apresentadas na Figura 5.4 também não exibem diferenças relevantes de valores. Outras comparações de perfil podem ser observadas no apêndice A. Portanto, para o estudo realizado, a partir do acabamento superficial da lixa 600 pode-se considerar que a orientação da medição não tem importância significativa para os valores de rugosidade analisados.

5.2. Anomalias Verificadas nas Medições

Considerando os discos resultantes da preparação superficial de lixamento e polimento, algumas observações podem ser realizadas a partir dos resultados obtidos. A primeira observação se dá por conta de anomalias encontradas em alguns dos perfis analisados que, segundo o critério de aceitação proposto abaixo para cada um dos acabamentos, resultou na rejeição de alguns corpos de prova. Estes critérios foram definidos analisando a R_q das amostras de cada processo e determinando um valor limite para os valores do parâmetro de rugosidade avaliado. O valor limite de cada processo de acabamento foi definido realizando uma análise de anomalias no perfil dos discos que apresentavam um valor de R_q discrepante do valor médio do processo. A partir daí, foi definido um valor de R_q de corte para cada processo. Pode-se observar na Tabela 5.2 abaixo os critérios estabelecidos para cada acabamento superficial, o número de discos rejeitados e a proporção de rejeição de cada processo de acabamento. Os valores de R_q de cada amostra podem ser verificados no apêndice B.

Tabela 5.2 - Critério de aceitação, número de discos rejeitados e proporção de rejeição para cada processo de acabamento superficial.

	Lixa 600	Lixa 1200	Polimento
Número de Discos	14	7	5
Critério de Aceitação	$R_q < 0,2 \mu\text{m}$	$R_q < 0,1 \mu\text{m}$	$R_q < 0,1 \mu\text{m}$
Número de Discos Rejeitados	2	1	3
Proporção de Rejeição do Processo [%]	14,29	14,29	60

Ao investigar os perfis reprovados segundo os critérios de aceitação, foram percebidas anomalias nos perfis medidos pelo rugosímetro. A Figura 5.6 mostra dois exemplos de perfil anômalo, onde a altura do perfil é o valor de rugosidade medido pelo aparelho e o comprimento de avaliação é o trajeto percorrido no disco, sendo o zero mais próximo do centro do disco e 7,5mm mais próximo à borda. Os demais perfis descartados podem ser vistos no apêndice C.

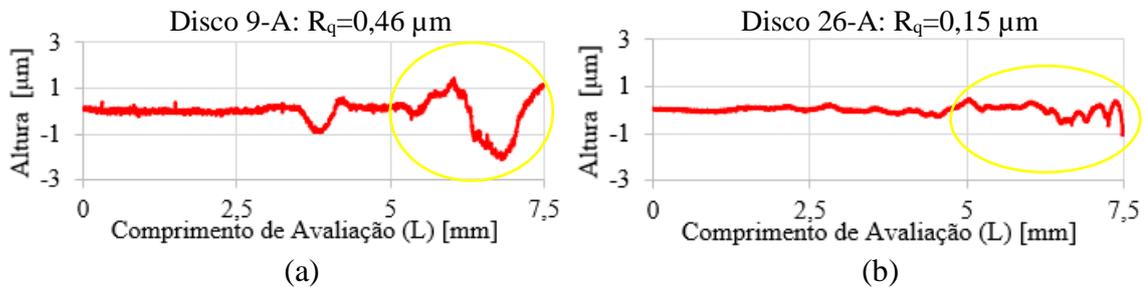


Figura 5.6 - Perfis de rugosidade apresentando anomalias: (a) lixa 600; (b) polido.

As deformidades dos perfis se mostram próximas às regiões da borda, tanto para os discos tratados na lixa 600 - que o critério de aceitação não é tão refinado quanto os demais; como os polidos - que a taxa de reprovação é muito maior que os discos lixados; e até para o disco finalizado em lixa 1200 - em que a anomalia verificada é mais sutil, porém reprovado pelo critério de aceitação proposto. Isso ocorre pelo fato de os processos serem todos manuais, e qualquer interferência (como aplicar mais pressão em uma região do disco por exemplo) pode afetar o resultado.

Após as verificações realizadas nos perfis avaliados foram rejeitados 2 discos finalizados na lixa de granulometria 600, 1 disco na lixa de 1200 e 3 discos após o processo de polimento, resultando respectivamente em 12, 6 e 2 discos aprovados. A Figura 5.7 facilita a visualização do número de peças aprovadas e reprovadas para cada processo de acabamento superficial. A Tabela 5.3 apresenta os novos valores médios de rugosidade após a reprovação dos discos anômalos.

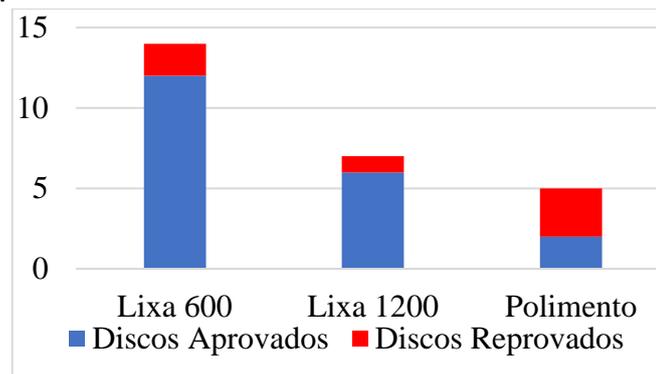


Figura 5.7 - Discos aprovados e reprovados de acordo com o processo de acabamento superficial.

Tabela 5.3 - Novos valores médios de rugosidade para cada Processo de acabamento superficial.

	Lixa 600	Lixa 1200	Polimento
Número de discos	12	6	2
R_a [μm]	0,097	0,048	0,04
Desvio Padrão de R_a	0,015	0,011	0,014
R_q [μm]	0,128	0,061	0,048
Desvio Padrão de R_q	0,022	0,015	0,018

5.3. Comparação das Distribuições dos Perfis

A fim de realizar uma comparação geral entre os processos de acabamento superficial propostos, a Figura 5.8 mostra a distribuição das rugosidades resultantes dos processos analisados após o descarte dos perfis anômalos. Apesar da semelhança nos valores de R_q para os discos polidos e os discos finalizados na lixa 1200, é nítida uma diferença entre suas distribuições.

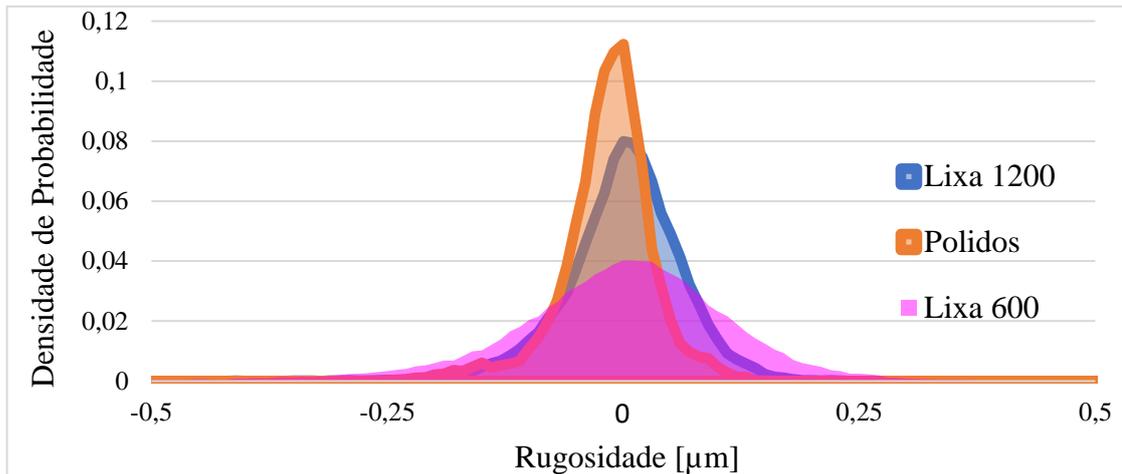


Figura 5.8 - Gráfico de densidade de probabilidade pelo valor de rugosidade para os discos na lixa 600, na lixa 1200 e polidos.

A principal observação é que, mesmo apresentando valores muito próximos de R_a e R_q , as distribuições dos discos polidos e dos discos tratados na lixa 1200 apresentam diferenciações evidentes. Nota-se que a curva da distribuição dos discos polidos é mais acentuada que a curva da lixa 1200 e que, por sua vez, se mostra mais aguda que a distribuição da lixa 600. De mesmo modo, é perceptível um deslocamento da curva da distribuição dos discos polidos em relação ao zero do eixo de rugosidade, fato esse menos visível nas distribuições dos discos lixados. As observações citadas podem ser mensuradas utilizando dois parâmetros de rugosidade, a assimetria e a curtose das distribuições, como mostra a Figura 5.9. Os valores de assimetria e curtose das medições de cada disco podem ser verificados no apêndice B

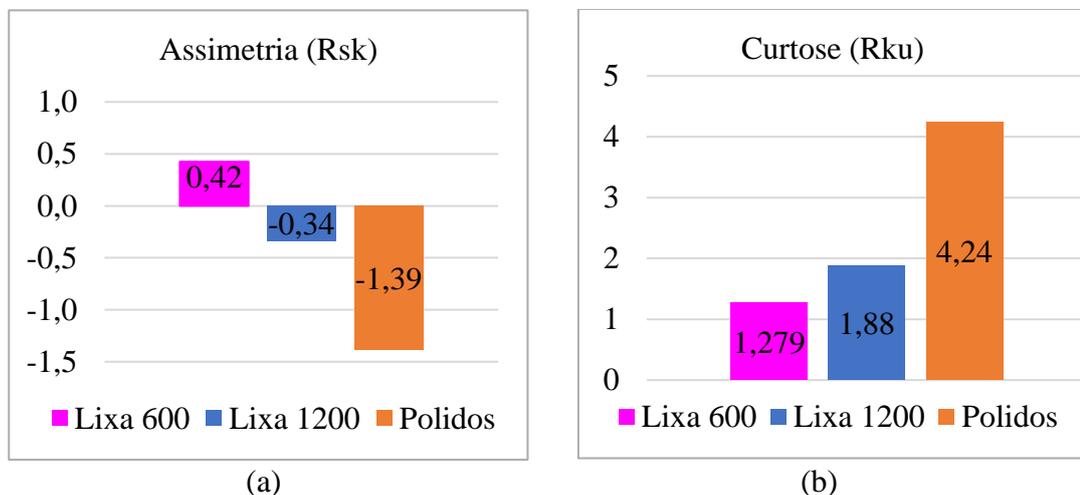


Figura 5.9 - Gráfico comparativo dos parâmetros de rugosidade: (a) assimetria R_{sk} ; (b) Curtose R_{ku} .

Os valores mais altos de curtose retratados no processo de polimento, seguido da lixa 1200, justificam a maior acuidade das curvas de densidade de probabilidade citadas acima, já que maiores valores de curtose indicam distribuições mais agudas. Isso significa que o processo de polimento possui uma maior concentração de pontos próximo à sua média, ou seja, uma menor quantidade de picos altos e vales profundos. Para os valores de assimetria ilustrados acima, a distribuição do processo de acabamento na lixa 600 apontou um valor positivo, o que significa que as lixas finalizadas nesse processo tendem a apresentar valores de picos mais altos que os demais. O valor de R_{sk} da curva dos discos polidos apresentou um valor negativo e inferior à lixa 1200. É observável uma diferença entre os lados esquerdo e direito dessa distribuição na Figura 5.8, sendo a curva do lado direito da distribuição mais íngreme que a curva do lado esquerdo. Isso ocorre porque o grão do polimento tem a capacidade de remover os picos da face submetida ao processo. Porém, como o refino é muito alto, é incapaz de alcançar a profundidade necessária para a remoção dos vales. A Figura 5.10 ilustra, de forma esquemática, a ação dos grãos do polimento em um perfil de rugosidade.

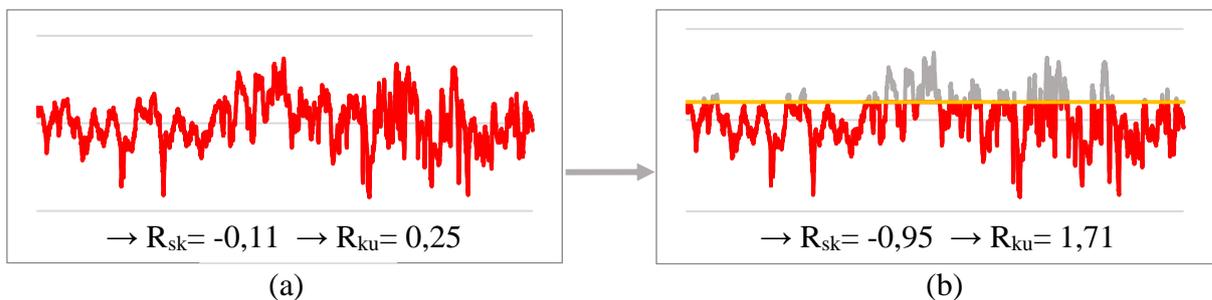


Figura 5.10 - Exemplo do efeito do polimento em um perfil de rugosidade: (a) Antes do polimento; (b) Após o polimento.

O grão do polimento age principalmente na redução dos picos, diminuindo sua altura e aumentando a concentração de valores próximos ao valor médio da rugosidade do perfil, consequentemente aumentando o valor de curtose da distribuição. Como o polimento afeta mais os picos do perfil que os vales, esse processo também aumenta a assimetria da distribuição.

5.4. Comparação entre R_a e R_q

Tanto a rugosidade média R_a , quanto a rugosidade média quadrática R_q , representam parâmetros de amplitude para a quantificação da rugosidade do perfil em um único valor. Com o intuito de demonstrar a relação entre esses parâmetros, a Figura 5.11 abaixo mostra os valores médios para cada acabamento superficial dos dois parâmetros, assim como a diferença entre os valores médios para cada processo.

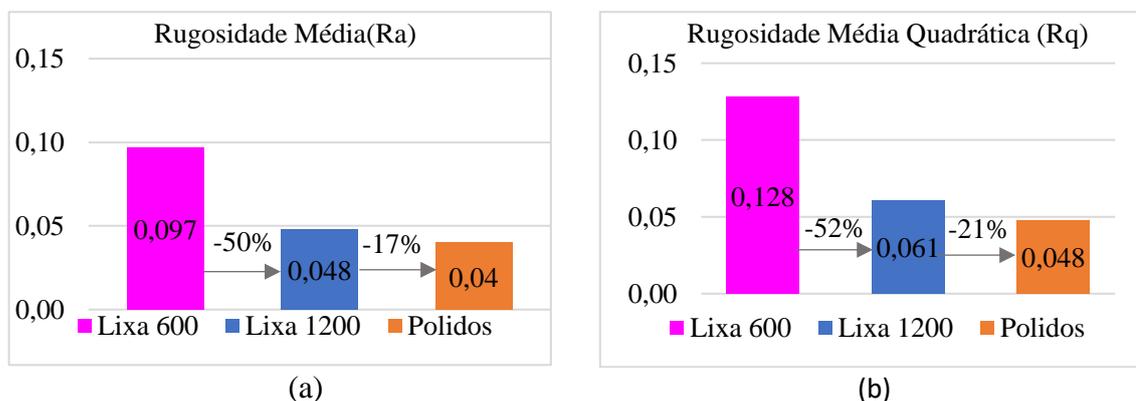


Figura 5.11 - Gráfico dos valores médios dos parâmetros de rugosidade [μm]: (a) Rugosidade média R_a ; (b) Rugosidade média quadrática R_q .

Ao avaliar os valores médios de rugosidade média R_a e rugosidade média quadrática R_q apresentados acima, percebe-se que a relação entre a variação dos valores se mantém em todos os processos de acabamento superficial analisados, assim como o decréscimo percentual dos valores de R_a e R_q . Para ratificar que a relação é mantida, a Figura 5.12 vincula todos os valores desses parâmetros obtidos nas medições dos corpos de prova realizadas, onde a Figura 5.12a mostra a relação em todos os processos e a Figura 5.12b destaca esse comportamento para as amostras lixadas e polidas.

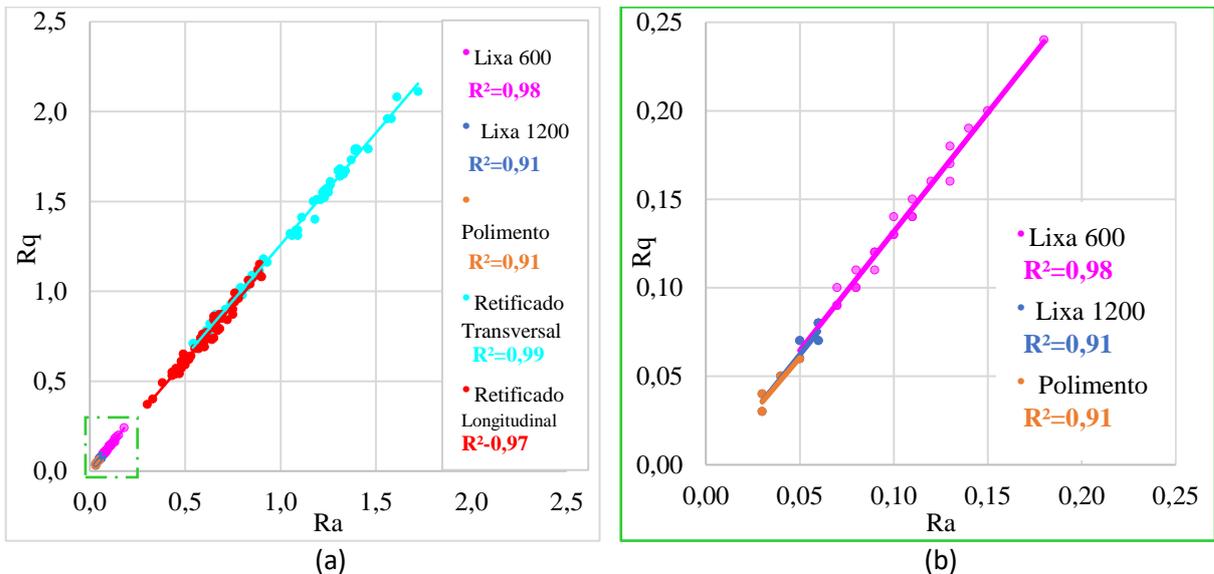


Figura 5.12 - Curva comparativa entre R_a (horizontal) e R_q (vertical) de cada acabamento superficial: (a)retífica lixas e polimento; (b)lixas e polimento.

Após analisar as curvas de comparação dos dois parâmetros entre as medições realizadas, fica claro que a relação entre R_a e R_q se mantém em todos os processos, não sendo dependente do processo de acabamento superficial. Além disso, os valores encontrados correspondem a valores previamente verificados na literatura: Segundo Hutchings e Shipway, 2017, o valor de R_q é em torno de 1,25 vezes o valor de R_a para distribuições de alturas da superfície que não apresentam marcas ou defeitos significativos.

6. CONCLUSÃO

O processo de acabamento superficial por polimento, quando bem executado apresenta bons resultados para os parâmetros de rugosidade analisados. Porém, as medições realizadas nos discos polidos evidenciaram muito mais anomalias em relação aos discos lixados em ambas as granulometrias (600 e 1200), manifestando uma taxa de reprovação de peças mais expressiva. Além disso, foi necessário um acréscimo excessivo no tempo de preparo para cada amostras desse acabamento superficial. Em comparação com a lixa 1200, são necessários 30 minutos a mais para a preparação do disco, o que representa 220% do tempo de preparação do processo de lixamento mais refinado. Portanto, o processo apresenta pouco controle na variável de entrada (rugosidade) para o ensaio e não apresenta confiabilidade para sua aplicação, pois os valores de rugosidade para esse processo são de menor repetibilidade quando comparado aos outros processos de acabamento.

Os corpos de prova submetidos ao processo de acabamento superficial da lixa 1200 apresentaram os melhores resultados. Os valores de R_q do processo da lixa 1200 se aproximaram dos valores obtidos pelo polimento. Esse procedimento também apresentou as

melhores taxas de aprovação dos corpos de prova, junto com a lixa 600, e com perfis mais bem definidos. Assim sendo, após esse estudo, é verificado que os discos preparados na lixa 1200 são os mais recomendados para a utilização de ensaios lubrificandos em tribômetro.

Por fim, pode-se destacar a utilização da rugosidade média quadrática (R_q) como o principal parâmetro de rugosidade para o controle das amostras, já que R_q apresenta alterações de valores mais significativas que R_a em variações imprevistas do perfil de rugosidade. Apesar de R_q reproduzir bons resultados para controle de rugosidade, para uma compreensão mais completa dos perfis e suas distribuições, são necessários parâmetros complementares, como R_{sk} e R_{ku} .

REFERÊNCIAS

- ACCADROLLI, Gláucio; DE VERNEY, João Carlos Krause. **Desenvolvimentos de um dispositivo para ensaios tribológicos do tipo pino-sobre-disco**. 6º Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, 7 a 9 de novembro, 2017. Sapucaia, RS, Brasil.
- BHUSHAN, Bharat. **Principles and applications of tribology**. 2ª ed. John Wiley & Sons, 2013.
- DONG, W.P; SULLIVAN, P.J; STOUT, K.J. **Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties**. Wear journal 178 (1994) p. 29-43, Elsevier, 1993.
- DOWSON, Duncan. **Developments in lubrication – the thinning film**. Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 25, 1992.
- GADELMAWLA, E.S; KOURA, M.M; MAKSOU, T.M.A; ELEWA, I.M; SOLIMAN, H.H. **Roughness parameters**. Journal of Materials Processing Technology 123 (2002) p. 133-145, Elsevier, 2002.
- GOLDENBERG, Mirian. **A arte de pesquisar**. Rio de Janeiro: Record, 2004.
- HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2ª ed. Elsevier, 2017.
- MACHADO, Alisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; ABRÃO, Alexandre Mendes; DA SILVA, Márcio Bacci. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2009.
- SEDLASEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. **Influence of surfacepreparation on roughness parameters, friction and wear**. Wear Jornal 266 (2009) p. 482-487, Elsevier, 2008.
- SEGY, D.Z; HWANG, P. **Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test**. Tribology international 91 (2015) p. 111-117, Elsevier, 2015.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE PERFIS DE RUGOSIDADE

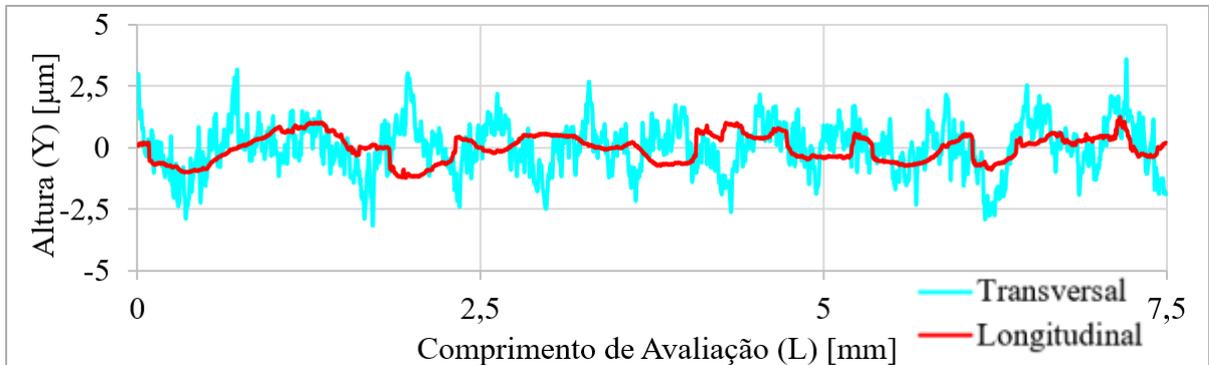


Figura A.0.1 - Disco retificado 13-A: Comparação entre perfil transversal(azul) e longitudinal(vermelho).

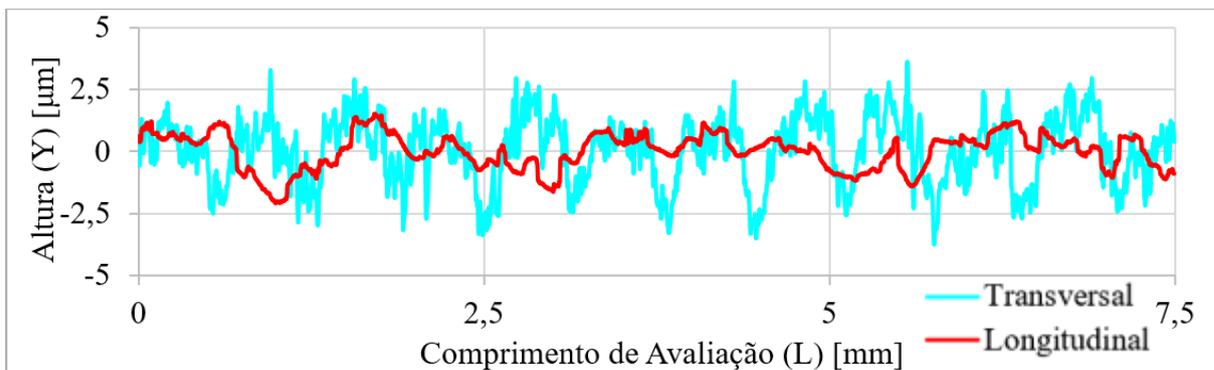


Figura A.0.2 - Disco retificado 20-A: Comparação entre perfil transversal(azul) e longitudinal(vermelho).

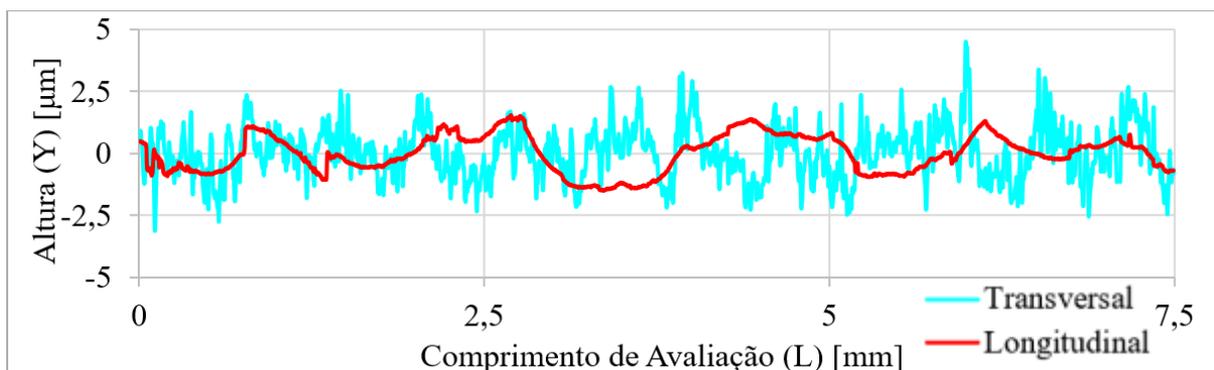


Figura A.3 - Disco retificado 12-B: Comparação entre perfil transversal(azul) e longitudinal(vermelho).

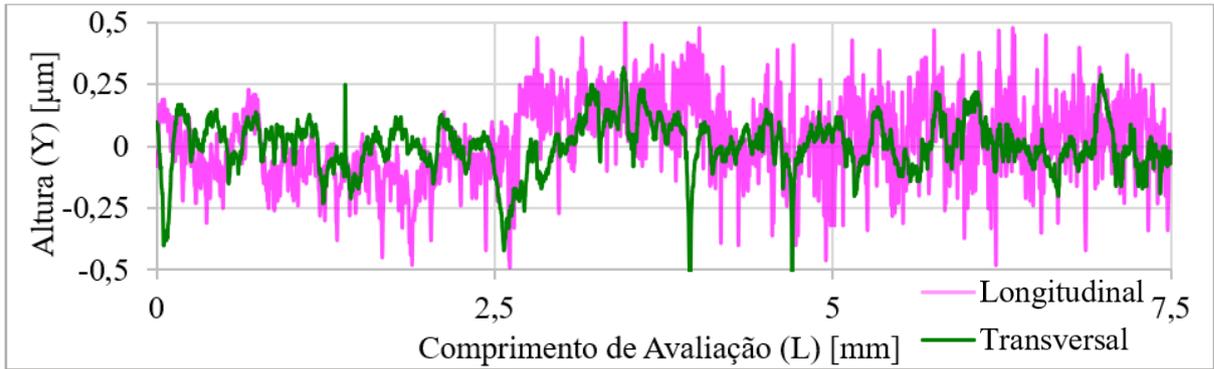


Figura A.4 – Lixa 600 - Disco 8-B: Comparação entre perfil transversal(verde) e longitudinal(rosa).

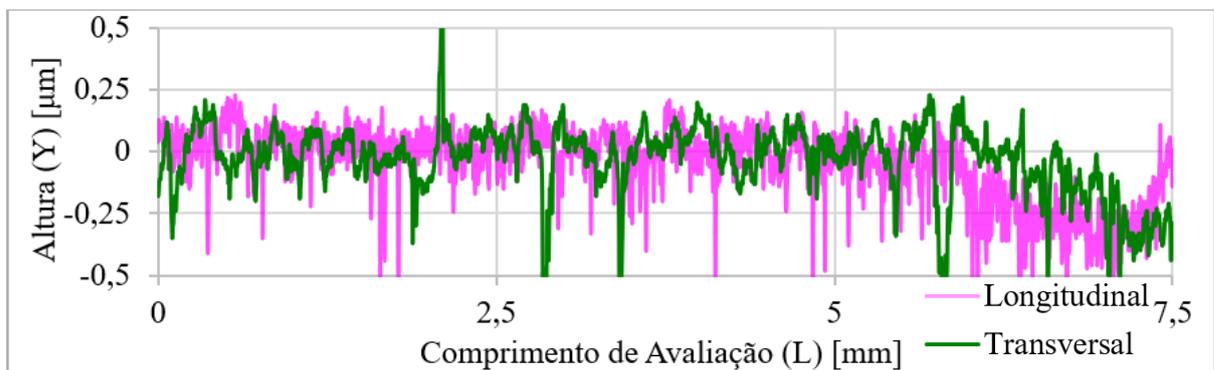


Figura A.5 – Lixa 600 - Disco 12-B: Comparação entre perfil transversal(verde) e longitudinal(rosa).

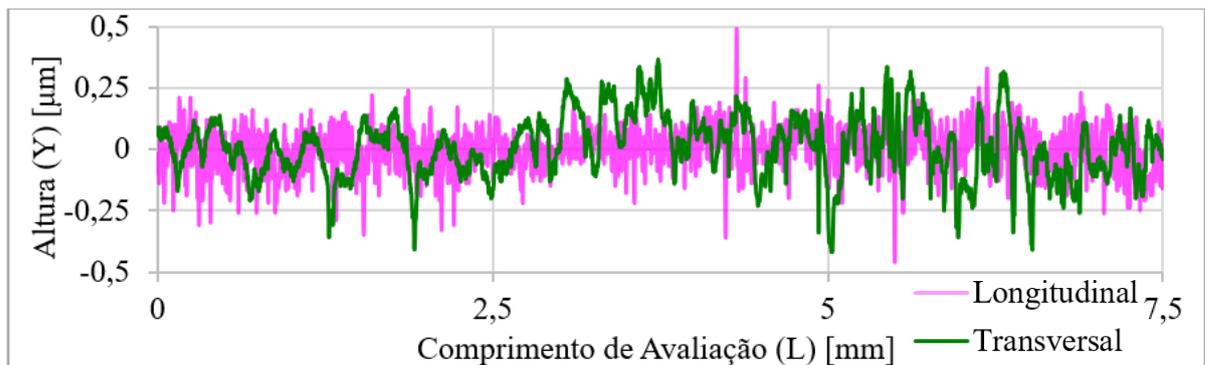


Figura A.6 – Lixa 600 - Disco 21-B: Comparação entre perfil transversal(verde) e longitudinal(rosa).

APÊNDICE B – TABELA DE VALORES DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Tabela B.1 - Valores dos parâmetros de rugosidade para as amostras de acabamento superficial de lixa 600.

Amostra	R_a	R_q	R_{sk}	R_{ku}
1-B Longitudinal	0,15	0,2	2,338	1,245
1-B Transversal	0,09	0,12	-0,745	2,006
5-B Longitudinal	0,07	0,09	-0,194	1,397
5-B Transversal	0,05	0,06	-0,493	1,19
6-B Longitudinal	0,11	0,14	1,056	1,938
6-B Transversal	0,06	0,08	0,997	1,907
7-B Longitudinal	0,27	0,38	0,499	2,13
7-B Transversal	0,05	0,07	-0,554	2,908
8-B Longitudinal	0,08	0,11	-0,738	2,387
8-B Transversal	0,13	0,16	-0,016	0
9-A Longitudinal	0,18	0,24	-1,6	3,658
9-A Transversal	0,37	0,47	1,293	2,464
10-A Longitudinal	0,07	0,1	-0,84	3,726
10-A Transversal	0,14	0,19	-0,068	0,919
11-B Longitudinal	0,12	0,16	-0,92	1,666
11-B Transversal	0,08	0,1	1,695	3,848
12-B Longitudinal	0,11	0,14	1,134	1,138
12-B Transversal	0,1	0,14	1,16	0,539
13-A Longitudinal	0,1	0,13	0,709	1,039
13-A Transversal	0,09	0,11	-0,503	0,014
14-A Longitudinal	0,08	0,1	0,652	1,296
14-A Transversal	0,13	0,17	1,567	3,847
15-A Longitudinal	0,11	0,15	1,703	4,253
15-A Transversal	0,09	0,12	-0,157	1,992
21-B Longitudinal	0,1	0,13	-0,109	0,248
21-B Transversal	0,07	0,09	0,345	1,162
24-B Longitudinal	0,13	0,18	1,531	1,885
24-B Transversal	0,07	0,09	0,084	-0,082

Tabela B.2 - Valores dos parâmetros de rugosidade para as amostras de acabamento superficial de lixa 1200.

Amostra	R_a	R_q	R_{sk}	R_{ku}
2-A Longitudinal	0,05	0,06	-0,182	0
2-A Transversal	0,06	0,07	-0,59	1,048
4-B Longitudinal	0,06	0,08	-1,411	4,099
4-B Transversal	0,06	0,08	-0,304	0,425
17-B Longitudinal	0,04	0,05	-0,023	-0,127
17-B Transversal	0,05	0,07	0,719	6,029
18-A Longitudinal	0,05	0,06	-0,403	-0,237
18-A Transversal	0,04	0,05	-0,673	1,247
19-A Longitudinal	0,03	0,04	-0,663	1,772
19-A Transversal	0,03	0,03	-0,351	0,404

22-A Longitudinal	0,07	0,11	3,853	5,197
22-A Transversal	0,05	0,06	-0,43	0,058
23-A Longitudinal	0,06	0,07	0,106	-0,218
23-A Transversal	0,04	0,07	-8,3	4,493

Tabela B.3 - Valores dos parâmetros de rugosidade para as amostras de acabamento superficial de polimento.

Amostra	Ra	Rq	Rsk	Rku
20-A Longitudinal	0,05	0,06	-1,553	7,489
20-A Transversal	0,05	0,06	-0,961	1,203
26-A Longitudinal	0,1	0,12	-0,41	0,103
26-A Transversal	0,12	0,15	-1,013	3,001
27-A Longitudinal	0,11	0,13	0,393	0,152
27-A Transversal	0,04	0,05	-0,084	0,123
28-A Longitudinal	0,03	0,04	-2,069	6,885
28-A Transversal	0,03	0,03	-0,958	1,383
29-B Longitudinal	0,15	0,21	0,385	6,796
29-B Transversal	0,1	0,14	-1,334	19,369

APÊNDICE C – PERFIS DESCARTADOS POR ANOMALIAS

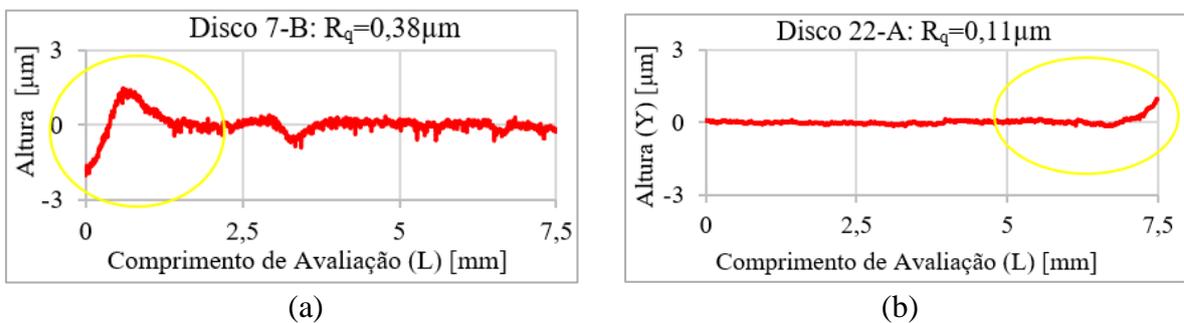


Figura C.1 - Anomalias verificadas nos perfis dos discos: (a)Lixa 600; (b) Lixa 1200.

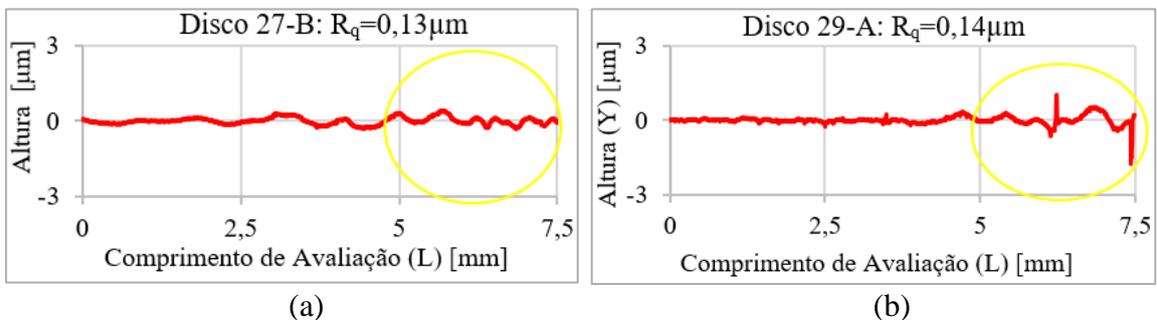


Figura C.2 – Anomalias verificadas nos perfis dos discos polidos.