

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUCAS ISAAC QUEIROZ DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E MICROESTRUTURAL
DO ROLAMENTO 6201**

BELO HORIZONTE
2019

LUCAS ISAAC QUEIROZ DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E MICROESTRUTURAL DO
ROLAMENTO 6201

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2019

LUCAS ISAAC QUEIROZ DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E MICROESTRUTURAL DO
ROLAMENTO 6201

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 05/07/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Eduardo dos Santos - Orientador

Prof. Claudinei Alfredo do Nascimento

Prof. Ernane Rodrigues da Silva

Dedico este trabalho ao meu pai e a minha mãe

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem me apoiado, incentivado, investido e acreditado na minha formação acadêmica.

Ao meu professor e orientador Carlos Eduardo dos Santos pela orientação de excelência, disponibilidade, treinamento em equipamentos e o acompanhamento em todas as etapas deste trabalho.

À professora Aline Magalhães pelas dicas e conselhos para a confecção deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG pelos ensinamentos.

Aos funcionários, técnicos, colegas de curso e estagiários do DEMAT pela disponibilidade e colaboração ao emprestar ferramentas, executar ensaios e esclarecer dúvidas.

Ao Ítalo Bruno dos Santos do departamento de Engenharia Mecânica da PUC MINAS do Coração Eucarístico, por disponibilizar a utilização da tridimensional do laboratório de Metrologia.

RESUMO

Neste trabalho encontra-se informações sobre a realização da caracterização tribológica, geométrica e mecânica de rolamentos comerciais do tipo 6201 dos fabricantes SNR e GBR. Trata-se de uma análise comparativa para avaliar as peculiaridades entre esses elementos de máquina. E teve como objetivos descrever e comparar parâmetros de amplitude e estatísticos de rugosidade obtidos por rugosímetro. Avaliar desvios dimensionais e geométricos via análise em máquina de medição tridimensional. E também comparar microestruturas e resultados de microdureza Vickers a partir de análise metalográfica. Sobre os resultados, obteve-se que um dos rolamentos apresentou melhor qualidade de acabamento superficial. Em relação à análise dimensional e geométrica, os dois rolamentos não atenderam às normas limitadoras de tolerâncias e apresentaram desvios geométricos que podem ser nocivos ao funcionamento adequado dos elementos rotativos. Além disso, os ensaios metalográficos evidenciaram que esses rolamentos são constituídos por estrutura martensítica revenida e um dos rolamentos apresentou microdureza Vickers que pode possuir melhor resistência ao desgaste para as estruturas desse elemento de máquina. Dessa forma, pode-se concluir qual dos dois poderá apresentar melhores características para resistir aos efeitos do atrito.

Palavras-chave: Rugosidade. Geometria. Dimensões. Resistência ao desgaste. Microdureza Vickers. Aço AISI 52100.

ABSTRACT

This paper has some data relative to the realization of tribological, geometric and mechanical characterisation of commercial roller bearings 6201 of SNR and GBR manufacturers. It will provide a comparative analysis in order to detect the peculiarities between these machine elements. The goals of this research were describe and compare 3D functional and statistics parameters measured by a portable surface roughness tester. Additionally, to validate dimensional and geometric errors using a coordinate-measuring machine. Also, to compare the microstructures and Vickers microhardness results by metallographic analysis. The results show that one roller bearing manifested the better surface quality control. In relation to the dimensional and geometric analysis, both demonstrated that they are not feasible because of the lack of accuracy which is written down and explained by technical standards. In addition, the metallographic testing indicates that those bearings are composed by tempered martensite structure. Furthermore, it indicates that one bearing has the most viable Vickers microhardness for its components to resist wearing. Thus, it was possible to define which roller bearing could have the better characteristics to resist the effects by friction.

Keywords: Roughness. Geometry. Dimensions. Wear resistance. Vickers microhardness. AISI 52100 Steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Rolamento esférico fixo de uma carreira.....	19
Figura 2 - (Hv) em função da temperatura de revenimento para aço com 1,08% de carbono. 21	
Figura 3 - a) Microestrutura do aço AISI 52100, laminado à quente, evidenciando grãos de perlita com cementita proeutetóide intergranular . b) Aço AISI 52100 esferoidizado, exibindo as esferas de carboneto dispersas em matriz ferrítica.....	22
Figura 4 - Micrografia do aço 52100 após a) tratamento de revenimento gerando estrutura martensítica com presença de carbeto finos e b) tratamento bainítico.	23
Figura 5 - Adesão por transferência de matéria.....	26
Figura 6 - Ilustração da deformação plástica por partículas abrasivas entre superfícies.....	27
Figura 7 - Micro-pites por desgaste por fadiga em micrografia ampliada 430X.	28
Figura 8 - Mecanismo de degradação corrosiva.....	28
Figura 9 - Duas superfícies em contato sob aplicação de força F de compressão.....	31
Figura 10 - Camadas superficiais em materiais.....	32
Figura 11 - Imagem de microscopia de força atômica de película de cobre.	32
Figura 12 - Perfil de superfície.	33
Figura 13 - Obtenção da rugosidade média em perfil de rugosidade.	34
Figura 14 - Diferentes perfis de rugosidade com Ra similares.....	34
Figura 15 - Parâmetros estatísticos (a) Rsk Assimetria e (b) Rku Curtose.	35
Figura 16 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott - Firestone e parâmetros descritivos.....	36
Figura 17 - Perfil de rugosidade, topográfico e curva de Abbot-Firestone.	37
Figura 18 - a) Topografia de superfície e b) curva de Abbott-Firestone de peça usinada.....	37
Figura 19 - Dimensões de rolamentos 6201.	41
Figura 20 - Fluxograma da metodologia referente ao procedimento experimental.	42
Figura 21 - Partes de um rolamento de uma carreira de esferas.....	42
Figura 22 - Rugosímetro portátil utilizado na medição de rugosidade.....	43
Figura 23 - Posicionamento do rugosímetro portátil e método de fixação durante medição da rugosidade da pista da capa interna.	44
Figura 24 - Máquina de medir por coordenadas do laboratório de metrologia da PUC Minas.	44
Figura 25 - Curvas de perfil da capa externa do rolamento A.....	47
Figura 26 - Curvas de Abbott-Firestone da capa externa do rolamento A.	47
Figura 27 - Curvas de perfil da capa externa do rolamento B.	48
Figura 28 - Curvas de Abbott - Firestone da capa externa do rolamento B.	49
Figura 29 - Curvas de perfil da pista da capa interna do rolamento A.	50
Figura 30 - Curvas de Abbott-Firestone da pista da capa interna do rolamento A.	51
Figura 31 - Curvas de perfis da pista da capa interna do rolamento B.....	52
Figura 32 - Curvas de Abbott-Firestone da pista da capa interna do rolamento B.....	53
Figura 33 - Curvas de perfil da capa interna do rolamento A.	55

Figura 34 - Curvas de Abbott-Firestone da capa interna do rolamento A.....	55
Figura 35 - Curvas de perfil do eixo interior da capa interna do rolamento B.....	56
Figura 36 - Curvas de Abbott-Firestone da capa interna do rolamento B.....	57
Figura 37 - Desenho e dimensões do rolamento A.....	58
Figura 38 - Desenho e dimensões do rolamento B.....	59
Figura 39 - Micrografia do a)anel externo, b)esfera e c)anel interno do rolamento A.....	63
Figura 40 - Micrografia do a)anel externo, b)esfera e c)anel interno do rolamento B.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação da composição química dos aços rolamentos.....	24
Tabela 2 - Tolerâncias dimensionais para anel interno de rolamentos radiais.	39
Tabela 3 - Tolerâncias dimensionais para anel externo de rolamentos radiais.	39
Tabela 4 - Resultados da análise geométrica do rolamento A.....	60
Tabela 5 - Resultados da análise geométrica do rolamento B.....	61
Tabela 6 - Composição química do rolamento A.	62
Tabela 7 - Composição química do rolamento B	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados do rugosímetro para a capa externa do rolamento A.....	46
Gráfico 2 - Resultados do rugosímetro para a capa externa do rolamento B.....	48
Gráfico 3 - Resultados do rugosímetro para a pista da capa interna do rolamento A.	50
Gráfico 4 - Resultados do rugosímetro para a pista da capa interna do rolamento B.	52
Gráfico 5 - Resultados do rugosímetro para a capa interna do rolamentoA.	54
Gráfico 6 - Resultados do rugosímetro para a capa interna do rolamento B.....	56
Gráfico 7 - Microdureza Vickers do rolamento A.....	65
Gráfico 8 - Microdureza Vickers do rolamento B.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tolerâncias geométricas e indicações em desenhos.....	40
Quadro 2 - Análise comparativa de rugosidade.....	66
Quadro 3 - Análise comparativa das dimensões e geometria.....	69
Quadro 4 - Análise comparativa metalográfica.....	71
Quadro 5- Medições da capa externa do rolamento A.....	78
Quadro 6 - Medições da capa interna do rolamento A.....	78
Quadro 7 - Medições das esferas do rolamento A.....	78
Quadro 8 - Medições da capa externa do rolamento B.....	79
Quadro 9 - Medições da capa interna do rolamento B.....	79
Quadro 10 - Medições das esferas do rolamento B.....	79

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AISI : American iron and steel institution
B: Largura
C: Carbono
Cr: Cromo
d: Diâmetro interno do anel interno
D: Diâmetro externo do anel externo
 d_1 : Diâmetro externo do anel interno
 D_2 : Diâmetro interno do anel externo
DEMAT: Departamento de engenharia de materiais
Hv: Dureza vickers
mm: milímetro
Mn: Manganês
Mo: Molibidênio
 M_{r1} : Fração de contato mínimo no núcleo do perfil
 M_{r2} : Fração de contato máxima no núcleo do perfil
N: Newton
P: Fósforo
 R_a : Rugosidade média
 R_q : Desvio médio quadrático
 R_k : Rugosidade média do núcleo
 R_{pk} : Rugosidade média dos picos
 R_{ku} : Curtose
 R_{sk} : Assimetria
 R_t : Profundidade da rugosidade
 R_{vk} : Rugosidade média dos vales
 R_z : Rugosidade média das maiores profundidades.
 $r_{1,2}$: Raio de chanfro
s: segundos
S: Enxofre
Si: Silício
V: Vanádio
W: Tungstênio
 σ : Desvio padrão
#: Mesh
 μ m: Micrometro
°: Graus
°C: Graus celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	ROLAMENTOS.....	18
3.1.1	Tipos de rolamentos	19
3.1.2	Materiais para rolamentos	19
3.1.3	Aços Rolamento	21
3.1.4	Desgaste em rolamentos.....	24
3.1.5	Mecanismo de falhas em rolamentos	29
3.2	TRIBOLOGIA APLICADA AOS ROLAMENTOS	30
3.2.1	Superfície	31
3.2.2	Parâmetros amplitude.....	33
3.2.3	Parâmetros estatísticos de rugosidade.....	35
3.3	METROLOGIA APLICADA AOS ROLAMENTOS	37
3.3.1	Análise geométrica.....	38
3.3.2	Tolerâncias dimensionais e geométricas em rolamentos	39
4	METODOLOGIA	41
4.1	DESMONTAGEM DOS ROLAMENTOS.....	42
4.2	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	43
4.3	ANÁLISE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA	44
4.4	ANÁLISE QUÍMICA	45
4.5	ANÁLISE METALOGRAFICA.....	45
4.5.1	Microscopia óptica	45
4.5.2	Microdureza Vickers.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	RUGOSIDADE	46
5.1.1	Capa externa.....	46
5.1.2	Capas internas: pista.....	50

5.1.3 Capas internas: interior	54
5.2 CONTROLE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO	58
5.2.1 Dimensões	58
5.2.2 Geometria	60
5.3 ANÁLISE QUÍMICA	61
5.4 METALOGRAFIA	63
5.4.1 Microscopia óptica	63
5.4.2 Microdureza Vickers	65
5.5 ANÁLISE COMPARATIVA	66
6 CONCLUSÃO	72
7 SUGESTÕES AOS TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	74
Anexo A - Quadros de desvios para medições dimensionais e geométricas do rolamento A..	78
Anexo B - Quadros de desvios para medições dimensionais e geométricas do rolamento B ..	79

1 INTRODUÇÃO

A caracterização dos materiais metálicos visa compreender as características estruturais que possam fornecer informações úteis, por exemplo, a respeito de propriedades mecânicas e resistência ao desgaste desses materiais. Dentre esses materiais, existem os rolamentos, que são específicos da indústria mecânica, e são elementos de máquinas capazes de reduzir perdas energéticas na forma de calor por minimizar o atrito. Isso, devido a presença de componentes rolantes que auxiliam no movimento de rotação. Os quais devem possuir rugosidade superficial adequada, geometria e dimensões em conformidade com os limites propostos por normas regulamentadoras, além de microestruturas duras e tenazes com faixas de durezas adequadas entre os componentes dos rolamentos para garantir eficácia e minimizar os efeitos de desgaste.

Entretanto, esses produtos encontram-se no mercado consumidor com valores muito discrepantes. E presume-se que ao adquirir rolamentos de custos amenos, o consumidor estará obtendo produtos de qualidade inferior. O que por um lado, pode ser benéfico do ponto de vista econômico pois contribui com a redução de custos. Porém, por outro, poderia ser perigoso para aplicações que exijam atendimento de protocolos de segurança, pois rolamentos de segunda classe estão destinados à falha catastrófica em maior frequência do que os de primeira classe. Por isso, valida-se a importância de avaliar as diferenças entre rolamentos de preços distintos para poder auxiliar na decisão de escolha de utilização daquele mais adequado ao projeto.

E esse trabalho realizará a caracterização comparativa de rolamentos 6201, os quais apresentam ampla área de utilização, que tange desde a utilização em eletrodomésticos até em componentes automobilísticos. Para isso, será avaliado os parâmetros de rugosidade de amplitude e estatísticos das superfícies passíveis em realizar contatos tribológicos nesses rolamentos. Além disso, será investigado os valores dimensionais e a regularidades geométricas dos rolamentos para averiguar se estes encontram-se de acordo com limites de tolerâncias. E também será feito análise microestrutural para descobrir valores de durezas das estruturas dos rolamentos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Caracterizar propriedades tribológicas e mecânicas em rolamentos 6201, do tipo axiais de uma carreira de esferas, comerciais de dois fabricantes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar os parâmetros de amplitude: R_a , R_q , R_t e R_z . E comparar os parâmetros estatísticos: R_{vk} , R_k e R_{pk} .
- Mensurar valores dimensionais e geométricos verificando se os produtos estão normatizados e de acordos com requisitos de tolerâncias.
- Realizar ensaio de microdureza com o intuito de sugerir qual dos rolamentos seria menos suscetível ao desgaste.
- Comparar as microestruturas por análises metalográficas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ROLAMENTOS

Os rolamentos abrangem o grupo de elementos de máquinas essenciais ao funcionamento de partes que rotacionam ou movem sistemas mecânicos. Tais componentes ainda transmitem cargas dinâmicas e/ou estáticas a um eixo central. E, devido ao movimento circular, propiciam a exposição homogênea da seção de área desses aparatos com o intuito de reduzir os efeitos do desgaste por atrito. Além disso, esses componentes possuem outras funções, como suportar estruturas mecânicas, conectar partes e transmitir movimento e força. E também são considerados componentes cruciais nas aplicações industriais, pois estão presentes em mais de 90% de maquinários (Gupta e Pradhan, 2016). Por isso, as falhas nesses equipamentos podem resultar, por exemplo, em perdas econômicas e acidentes catastróficos.

A estrutura básica desses elementos abrange dois anéis: um interno e outro externo. E entre esses concêntricos há elementos rolantes enfileirados e fixados por uma gaiola. Os quais, de acordo com Bhushan (2001), possuem tal configuração para minimizar a ocorrência de deslizamento e, conseqüentemente, reduzir a perda de material por fricção. E as vantagens não se limitam apenas por esse ponto de vista. Pois além dessas, essas estruturas exigem menor dependência de lubrificação, se comparadas com estruturas deslizantes, e também apresentam facilidade de manutenção. Além disso, ressalta-se que os processos de fabricação desses componentes são distintos. Em que os anéis podem ser produzidos por processos de forjamento, em seguida torneados, submetidos a tratamento térmico e polidos. Já as esferas poderiam ser confeccionadas também por forjamento, desbastadas, tratadas termicamente e polidas. E as gaiolas por estampagem, prensagem, furação e tratamento térmico (Bhadeshia 2011, p. 2).

E no que se refere às aplicações, esses componentes tribológicos podem ser utilizados em máquinas rotativas, ferramentas e nas indústrias automobilística e aeronáutica. Os quais visam aumentar eficiência e reduzir os efeitos de fricção sobre condições críticas de trabalho (PANDA et. al, 2015). Essas, por exemplo, analisadas em peças submetidas à combustão interna de motores, como nos virabrequins. Também no que tange às aplicações, existem diversos tipos de designs empregados aos rolamentos e as opções de escolha compreendem: quantidade e tipos de força suportadas, velocidade de giro, temperatura de trabalho, espaço, ruídos, dentre outros fatores.

3.1.1 Tipos de rolamentos

O principal fator classificatório dos rolamentos inclui o tipo de geometria dos elementos rolantes, os quais podem ser cilíndricos, esféricos ou cônicos. Porém, as categorias mais utilizadas envolvem os dois primeiros citados.

- Rolamentos esféricos:

Suportam cargas radiais e axiais moderadas e são apropriados para condições de elevada frequência rotativa. Entretanto, suportam menores esforços compressivos, pois são mais propícios à deformação plástica por possuírem menor área de contato (Bhushan, 2013, p.633). E os elementos girantes são esferas, dispostas em carreiras simples ou compostas que suportam maiores cargas do que elementos girantes cônicos. Além disso, as esferas podem formar ângulos de contato com os anéis, os quais suportam maiores cargas axiais quanto maior for o ângulo. E por outra análise, os baixos valores angulares adéquam-se às situações de baixo período rotativo. A figura 1 evidencia um exemplo de rolamento fixo esférico de carreira única. Os quais podem estar contidos em esteiras mecânicas, rodas de patins e ventilações industriais

Figura 1- Rolamento esférico fixo de uma carreira



Fonte: Bhushan (2001)

3.1.2 Materiais para rolamentos

De acordo com Baskar et al. (2017), não existem materiais padronizados para se produzir rolamentos. Pois, estes podem ser confeccionados por materiais cerâmicos, poliméricos, metálicos ou compósitos. E a seleção adequada deverá considerar as condições

de operação, o tipo de aplicação, a velocidade, cargas aplicadas e também a lubrificação. Sobre as propriedades, Gebretsadik, Hardell e Prakash (2015) mencionam os tangíveis aos aspectos tribológicos, e que esses devem coibir elevada fricção, garantir resistência ao desgaste, capacidade de embebição de lubrificantes, conformabilidade e incompatibilidade química com outros elementos, já que os rolamentos são articulados por outras partes mecânicas, sendo então indesejável ocorrer a coalescência entre essas.

Por outro lado, e relativo às propriedades mecânicas, os rolamentos devem possuir elevada resistências mecânica, à compressão e a fadiga para suportarem cargas localizadas e também para minimizar o colapso sob movimento cíclico. Além disso, necessitam de boa tenacidade a fim de suportarem elevadas cargas de impacto para resistirem à ruptura. E requerem alta condutividade térmica e estabilidade a quente para evitar o acúmulo de calor para não comprometer o funcionamento desses produtos. Os rolamentos também devem possuir boa resistência à corrosão para minimizar efeitos de mobilização de elétrons acarretado pelo meio ambiente ou óleos lubrificantes (Dean e Evans 1976, p.101).

E dentre as classes de materiais, Harnoy (2003) exemplifica carboneto de silicone, óxido de alumínio e nitreto de silicone como materiais cerâmicos cabíveis de constituir rolamentos. Os quais são vantajosos por apresentarem, baixa densidade, elevada resistência à corrosão, à eletricidade e ao calor. Entretanto, são limitados devido aos elevados custos. Além disso, apenas o nitreto de silicone apresenta boa eficiência, porque essa cerâmica avançada apresenta tenacidade similar a dos aços. E dentre os materiais poliméricos, o autor cita a aplicação de termoplásticos como nylon, teflon, termorrígidos fenólicos e algumas borrachas. Os quais não possuem propriedades mecânicas e térmicas satisfatórias, entretanto, possuem vantagens econômicas, além de possuírem baixa densidade, auto-lubrificação, resistência ao impacto e boa resistência à corrosão.

Quanto aos materiais metálicos, os rolamentos podem ser feitos por metais baixa-liga de elevada qualidade ou aços. Dentre o primeiro grupo, estão contidos os metais brancos à base de ligas de estanho e chumbo. Estas, que além de deformarem plasticamente sob elevadas tensões sem sofrerem ruptura, também possuem excelente conformabilidade e resistência à fadiga. No entanto, essas possuem uma matriz macia que não confere resistência ao desgaste. E outro exemplo de metal baixa-liga utilizado corresponde as ligas de cobre e chumbo cujas propriedade compreendem boa resistência mecânica e à fadiga e elevada temperatura de trabalho. Porém, a fase plúmbica possui baixo potencial de redução e é suscetível à oxidação pela ação de lubrificantes. Por outro lado, há também ligas de bronze, alumínio e prata cujas limitações manifestam-se devido à dificuldade de produção para a

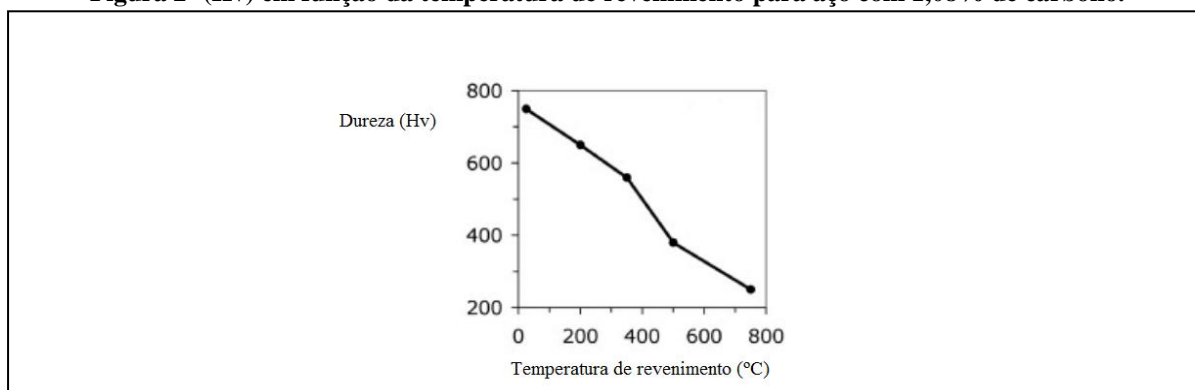
primeira, baixa resistência à fadiga para a segunda e falta de resistência mecânica para as argêntas (Harnoy, 2003, pp. 301-320).

3.1.3 Aços Rolamento

Bhushan (2001) afirma que aços de alto teor de carbono são os mais utilizados para produzir rolamentos, desde que estes possuam elementos de liga capazes de conferi-los maior dureza e, por conseguinte, propiciar maior resistência ao desgaste. Além disso, Bhadeshia (2011) declara que esses rolamentos devem ser tratados termicamente e endurecidos por transformação martensítica e revenidos em baixa temperatura para conduzi-los à uma estrutura dura e tenaz, que é a martensita revenida. Por outro lado, os rolamentos com menores teores de carbono, os quais são mais tenazes e menos duros, devem ser endurecidos para minimizar os efeitos de desgaste. O autor também afirma que o aço mais coerente para a confecção de rolamentos seria o 1C-1.5Cr, este que possui estrutura livre de inclusões a fim de minimizar efeitos de fadiga. O autor também cita a liga M50 e suas variações como importantes materiais por possuírem maiores resistência à deformação a quente.

Além desses, existem outros aços de alto teor de carbono cabíveis aos rolamentos e Harnoy (2003) complementa que dentre esses está o AISI 52100. O qual vem sendo muito utilizado para constituir anéis e elementos rolantes esféricos, principalmente por possuir elevada resistência ao desgaste. Isso devido a constituição de fases extremamente duras após a realização de tratamento térmico de têmpera e revenimento. Para complementar, a figura 2 indica a variação de dureza em função da temperatura de revenimento de um aço com 1,08% de carbono. Na qual nota-se que para rolamentos é desejável realizar esse tratamento térmico em temperaturas menores para garantir elevada dureza.

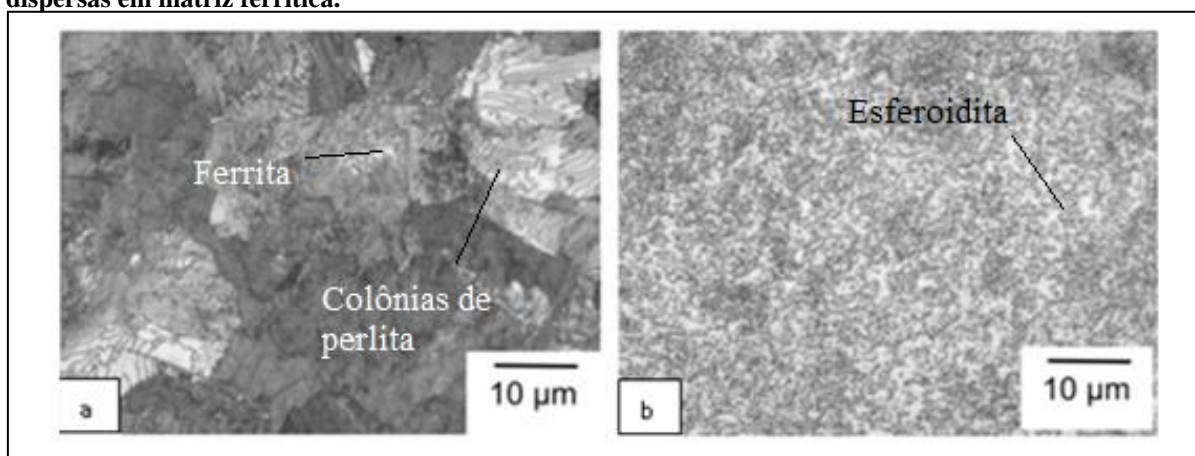
Figura 2- (Hv) em função da temperatura de revenimento para aço com 1,08% de carbono.



Fonte: Adaptado de Bhadeshia (2012).

E antes desses tratamentos, obtém-se estruturas menos duras como perlita, ferrita e cementita. E essas microestruturas podem ser analisadas na figura 3(a). Entretanto, a estrutura apresentada não é a mais adequada para rolamentos pois além da dureza não adequada, há também contornos de grãos protuberantes capazes de concentrar energia e serem via de propagação de trincas, o que viabiliza uma catástrofe por fadiga. Assim, para minimizar esse problema, pode-se utilizar rolamentos com microestruturas semelhantes à da figura 3(b), por exemplo, que exibe o mesmo aço, porém submetido ao processo de esferoidização. No qual transforma carbonetos em esferas dispersas sobre uma matriz ferrítica, o que garante maior tenacidade ao material e reduz a dureza. O que seria um problema ao ponto de vista do desgaste, porém, excelente ao passo que tenacifica o material.

Figura 3- a) Microestrutura do aço AISI 52100, laminado à quente, evidenciando grãos de perlita com cementita proeutetóide intergranular . b) Aço AISI 52100 esferoidizado, exibindo as esferas de carboneto dispersas em matriz ferrítica.

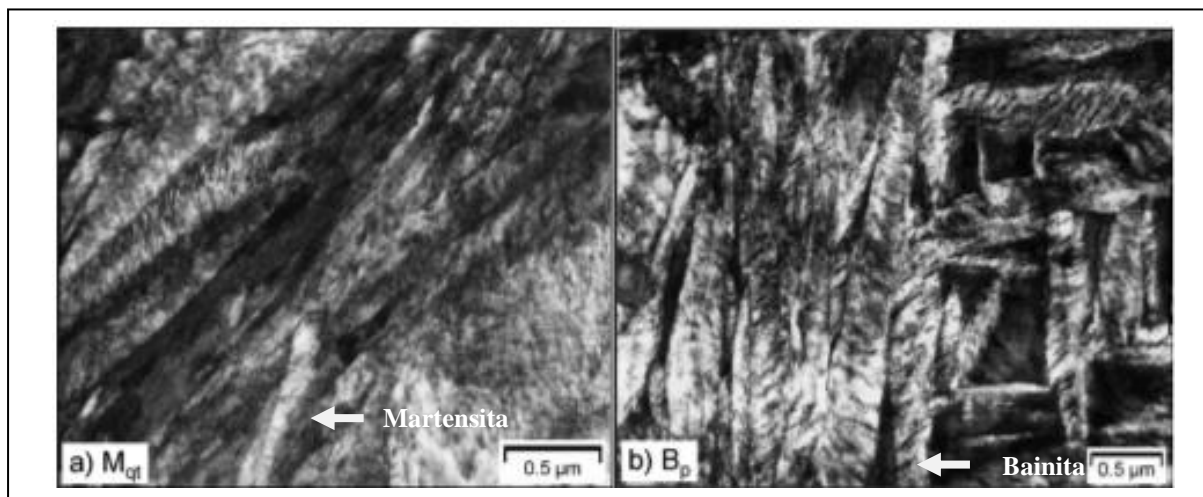


Fonte: Bhadeshia (2011)

Além dessas características, Takadoun (2008) também define que estruturas martensíticas, exibidas na figura 4(a), e bainíticas, evidenciadas pela figura 4(b), são preferíveis para os rolamentos. Pois as primeiras são extremamente duras e frágeis enquanto as segundas além de demonstrarem boa dureza também são tenazes. E Colpert (2008) complementa que estruturas bainíticas são preferíveis em rolamentos utilizados em ambientes úmidos devido a maior resistência à fadiga. Entretanto, requerem maior gasto energético de produção do que a obtenção de estruturas martensíticas, de acordo com Dong et al. Isso, devido ao fato da austenita precisar ser totalmente convertida em bainita, enquanto o mesmo não ocorre para a formação de martensita. No entanto, se o intuito é aumentar resistência à fadiga, os autores concluem que os tratamentos bainíticos são mais viáveis. Além disso, Takadoun (2008) também ressalta que esses elementos de máquinas devem ser submetidos

ao tratamento de cementação para elevar a dureza superficial e, conseqüentemente, também a resistência ao desgaste.

Figura 4 - Micrografia do aço 52100 após a) tratamento de revenimento gerando estrutura martensítica com presença de carbeto fino e b) tratamento bainítico.



Fonte: Adaptada de Dong et. al (2009)

Entretanto, os rolamentos não se restringem apenas aos aços de elevado teor de carbono, pois emprega-se também nesses produtos o aço AISI 4118 tratado termicamente por cementação. O qual apresenta considerável vantagem, devido a presença de uma superfície dura e resistente ao desgaste abrasivo, e por baixo dessa contém um material resistente ao impacto por conserva-se predominantemente na fase ferrítica, a qual é macia e dúctil (Harnoy, 2003, p.506). Já em relação às ligas especiais, Qiu et al. (2017) acrescentam que no universo dos aços ferramentas, o GCr15 e GCr15SiMn juntos representam em torno de 80% do total dessa categoria de aços utilizados nas indústrias produtoras de rolamentos. Isso, porque esses conferem não apenas elevada resistência mecânica como também resistência ao desgaste sob elevadas temperaturas. As quais, de acordo com Bhushan (2013) podem atingir em torno de 320°C em aços rápidos do tipo AISI M1, AISI M2 e AISI M50.

E analisando sob o ponto de vista corrosivo, as ligas de aços inoxidáveis devem ser utilizadas em materiais que se submetem aos meios que apresentam elementos com elevado potencial redutor. Como, por exemplo, ligas AISI 440C (Bhushan, 2001, p.1048). Além dessas, Qiu et al. (2017) afirmam que também aplicam-se ligas inoxidáveis martensíticas ou austeníticas endurecidas por precipitação. Estas que contém soluções sólidas supersaturadas capazes de aumentar a dureza e a resistência à corrosão. No entanto, as primeiras destacam-se

pela elevada dureza, resistência ao desgaste e resistência à fadiga. Dessa forma, a tabela 1 evidencia os tipos de aços e a composição química determinada por cada bibliografia.

Tabela 1- Especificação da composição química dos aços rolamentos

Aço	Elementos químicos (porcentagem)								
	C	Cr	Mn	Si	Mo	W	V	S	P
1C-1.5 Cr	0.98	1.5	0.15	0.25	≤0.10	-	-	≤0.025	≤0.025
AISI 52100	0.98	1.39	0.38	0.16	0.02	-	-	0.06	0.12
AISI 4118	0.18	0.4	0.15	0.15	0.08	-	-	-	-
GCr15	0.95	0.35	0.15	0.15	-	-	-	-	-
GCr15SiMn	0.95	1.4	0.95	0.45	-	-	-	-	-
AISI M1	0.78	3.5	0.15	0.2	8.2	1.4	1	-	-
AISI M2	0.75	3.75	0.15	0.2	8.2	5.5	1.75	-	-
AISI M50	0.75	3.75	0.15	0.2	3.9	-	0.8	-	-
AISI 440C	1.1	17	0.75	1	0.75	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Desgaste em rolamentos

O desgaste ocorre naturalmente quando entre duas superfícies manifestam-se interações. E nos rolamentos, essas acontecem por movimentos deslizantes entre as exterioridades e os fluídos. Também ocorrem por rotação, de forma intraespecífica pelas estruturas do rolamento e interespecífica entre esse com o eixo. Assim, a combinação entre esses movimentos e as condições do meio propiciam condições de desgastes aos rolamentos de forma adesiva, abrasiva, corrosiva e por fadiga (Qiu et al., 2017, p.3). E a seguir, será tratado as peculiaridades do desgaste com ênfase aos movimentos rotativos e também às condições de aplicação dos rolamentos.

Os mecanismos de desgaste por ambos movimentos apresentam distinções e a principal diferença se refere à fricção do deslizante ser mais severa que a do rolante (Bhushan, 2013, p.232). Este que, de acordo com Qiu et al. (2017), possui três origens. A primeira, por microdeslizamento, determinante do desgaste sofrido entre as componentes tangenciais dos movimentos dos corpos rolantes. A segunda, devido a deformação plástica, que é diretamente proporcional à quantidade de carga aplicada e à energia dissipada. E a última, por efeito adesivo, o qual ocorre pela coalescência entre as superfícies rolantes com afinidade química, que logo são rompidas devido a aplicação concomitante de movimentos relativos opostos.

Em relação aos desgastes por deslizamento e deformação plástica aplicados em rolamentos esféricos, Wang et al. (2018) concluíram que a rugosidade das pistas das capas internas apresenta efeitos significativos sobre esses movimentos nas esferas. Porque quando a rugosidade da pista for elevada e não houver tensão suficiente para gerar forças de tração, então a velocidade de deslizamento e o movimento rolante das esferas serão minimizados. O que acarreta maior fricção dos elementos rolantes sobre a pista, e conseqüentemente, atenua o desgaste. Ainda cima, os autores indicam que outra justificativa do elevado desgaste nas pistas rugosas justifica-se devido à menor cobertura de lubrificante, o que desprotege a superfície do efeito de fricção. Além disso, os rolamentos que apresentam vazamento de lubrificante, acúmulo de calor e diferença abrupta nas alturas de rugosidade também estão suscetíveis a deformações de superfície (Kumar, Azam e Ghosh 2019, p.264) .

No que tange à corrosão, as formas de desgaste mais suscetíveis em rolamentos são representadas por erosão, frestas, uniforme e pites. E as razões para esses tipos de corrosões incluem a natureza química dos lubrificantes e das superfícies em contato dos elementos de máquina. E Bardal (2003) discute que os lubrificantes podem conter elementos corrosivos capazes de desencadear corrosão uniforme, por pites e erosiva, esta que acontece principalmente em ambientes onde há desgaste mecânico e ação de fluxo. Em relação às superfícies de contato, a corrosão por atrito manifesta-se nos rolamentos, porque o movimento rolante aliado à aplicações de cargas propiciam o desgaste adesivo, e conseqüente remoção de óxidos e exposição de superfície aptas a serem oxidadas.

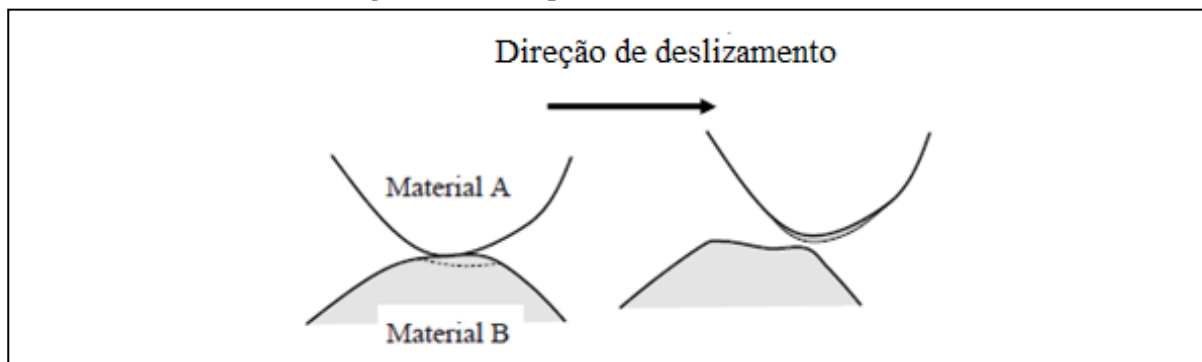
Além disso, Neale (1996) afirma que nos rolamentos em que são aplicadas elevadas tensões e mínimo deslizamento, o desgaste por fadiga é o mais proeminente e Bhushan (2013) destaca que o desgaste adesivo é vetado quando utiliza-se lubrificante para separar o contato tribológico. Entretanto, as tensões cisalhantes aplicadas a esses fluxos são constantemente transmitidas às superfícies dos materiais e, por conseqüência, essas podem se desgastar por fadiga. O autor ainda argumenta que pelo o fato das superfícies dos rolamentos serem endurecidas, essas podem estar frágeis e, conseqüentemente, propícias a serem desgastadas por fadiga.

- Desgaste adesivo

Halling (1978) define que esse tipo de desgaste acontece quando duas superfícies possuem movimentos relativos e nessas praticam-se pressão. A qual exercerá tensão de cisalhamento capaz de ultrapassar o limite de resistência do material mais macio e, por

consequência, deformará plasticamente as asperezas. E caso esses materiais possuam afinidade química, as porções deformadas se unirão ao material de maior dureza por soldagem a frio (Figura 5).

Figura 5- Adesão por transferência de matéria.



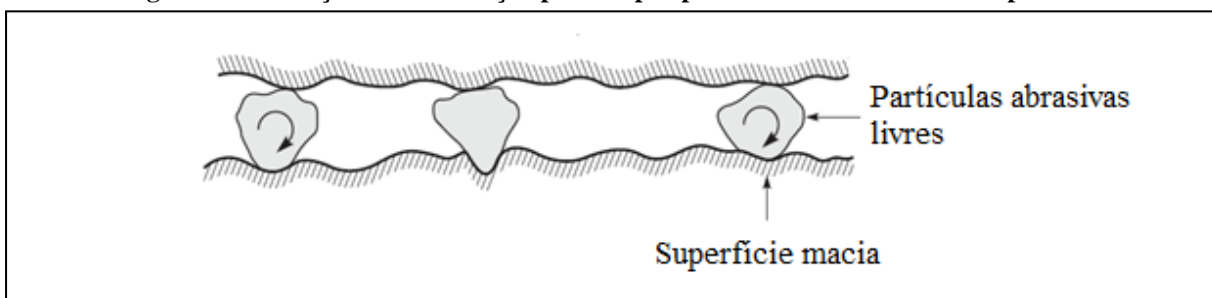
Fonte: Adaptado de Takadoum (2008)

Além disso, esse tipo de desgaste pode ocasionar o fenômeno *stick-slip*, em consequência da adesão e cisalhamento intermitentes. Esses que, por consequência, impedem a constância da velocidade durante o deslizamento (Takadoum, 2008, p.63). E Qiu et al. (2017) explicam que o fenômeno ocorre por dois motivos. O primeiro, por determinar que a força de atrito reduz em consequência do aumento da velocidade deslizante. E o segundo, por assumir que a força de atrito aumenta em decorrência do maior tempo de contato causado por interações químicas superficiais. E Bhushan (2003) complementa que esse efeito pode ser responsável pelos ruídos e vibrações de rolamentos. Os quais, de acordo com Park et al. (2017), aceleram o desgaste superficial.

- Desgaste abrasivo

Ocorre quando materiais duros deformam plasticamente regiões macias de uma superfície. Sendo que tais materiais podem constituir a estrutura de uma dessas ou representarem um terceiro corpo ao tribo-contato, como partículas de areias ou detritos metálicos (Askeland, Fulay e Wright, 2010, p.880). E esse tipo de desgaste pode apresentar diferentes mecanismos de deterioração. Como o micro-corte (Figura 6), este caracterizado por ranhuras contínuas causadas pelas partículas abrasivas que quando pressionadas e movimentadas deformam continuamente a superfície suscetível (Qiu et al., 2017, p.72).

Figura 6 - Ilustração da deformação plástica por partículas abrasivas entre superfícies.



Fonte: Adaptada de Bhushan (2013)

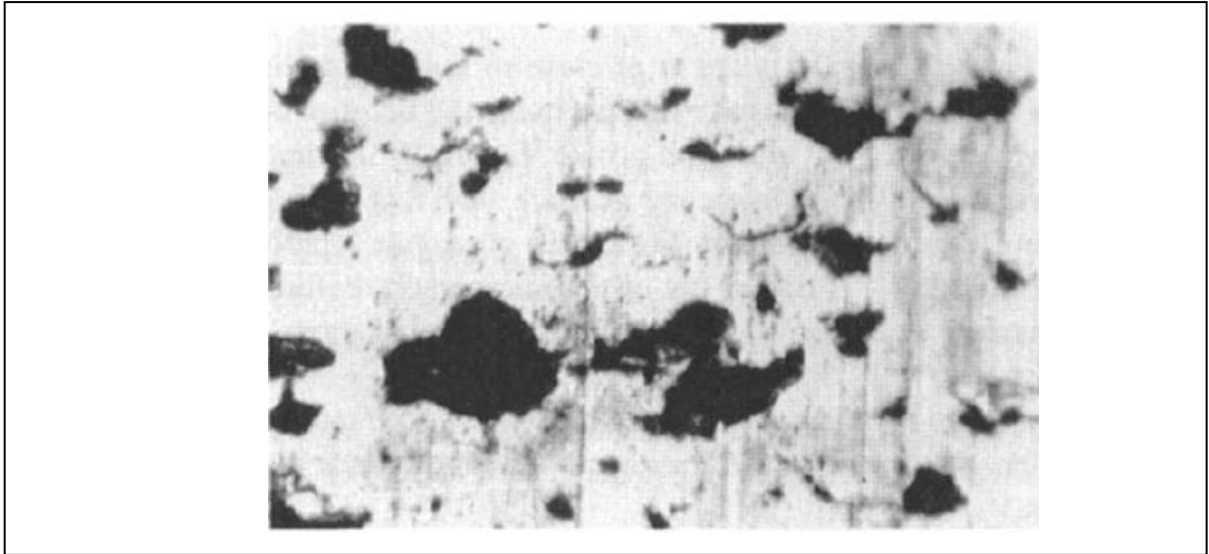
E de acordo com Halling (1978), existe uma relação entre desgaste, dureza e carga aplicada. No qual há uma relação inversamente proporcional entre desgaste e a dureza da superfície de menor dureza e relação direta com a carga aplicada. Além disso, as taxas de desgaste abrasivo também são influenciadas pela velocidade de deslizamento entre as superfícies. E não só o formato, tamanho e a natureza química dos abrasivos que são fatores importantes, mas também lubrificação e resistência mecânica, porque quanto mais lubrificado menor será a força de atrito e quanto mais resistente maior será a atuação do abrasivo no meio (Binder, Flocke e Doebbler, 2017, p.376).

- Desgaste por fadiga

Quando um material se submete à estresses cíclicos, pode sofrer desgaste por fadiga. O qual caracteriza-se pelo aparecimento de rachaduras paralelas às superfícies em função da aplicação de tensões superficiais pelas asperezas (Figura 7). E quando as fendas alcançam tamanhos críticos, essas desprendem-se do material (Takadoun, 2008, p.83). E Qiu et al. (2017) complementa o mecanismo ao ressaltar que caso o sistema tribológico esteja lubrificado, o líquido poderá penetrar nas fendas e aumentar a pressão interna que, por consequência, fornecerá energia capaz de alastrar as aberturas.

Além desses fatores, Booser (1997) indica que a excessiva vibração durante o contato superficial também pode transmitir energia dissipadora de trincas. E, adicionalmente, outros motivos intensificadores desse desgaste abarcam as elevadas intensidades de forças aplicadas, assim como as fricções entre as superfícies e velocidades. Isso, devido a maior capacidade de produzir e dissipar energias no sistema que, por conseguinte, aceleram o desgaste por fadiga (Qiu et al., 2017, p.64).

Figura 7 - Micro-pites por desgaste por fadiga em micrografia ampliada 430X.

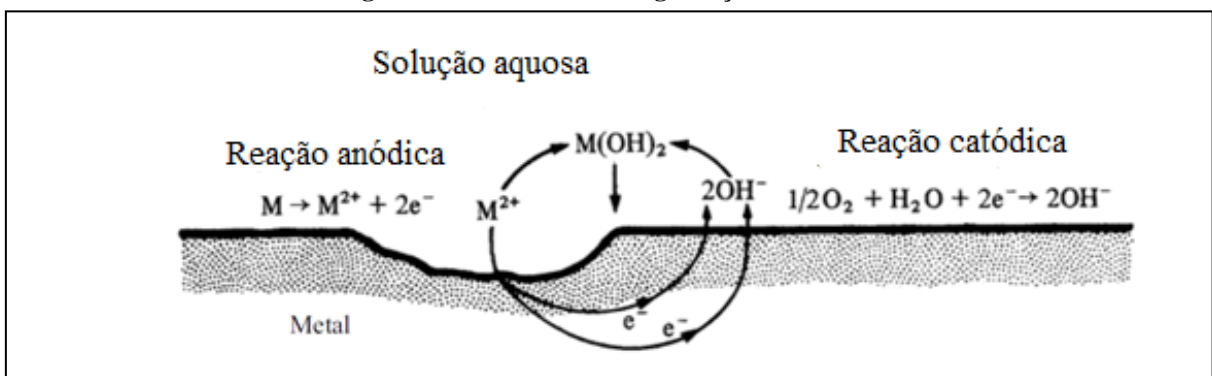


Fonte: Booser (1997)

- Desgaste por corrosão

Acontece quando superfícies se sujeitam ao ataque químico por ácidos ou por elementos capazes de gerar uma diferença de potencial que induz reações de óxido-redução (Dekker, 2003, p.300). E pode ocorrer de forma triboquímica ou química. As quais são auxiliadas por meio corrosivo como o ar atmosférico, que contém umidade e gases, ou por lubrificantes que possuam agentes redutores. A figura 8 representa o mecanismo básico de corrosão de uma superfície em contato com meio líquido e oxigênio.

Figura 8 - Mecanismo de degradação corrosiva.



Fonte: Adaptada de Bardal (2003)

O desgaste químico ocorre quando há um potencial capaz de transferir elétrons às espécies químicas de maior potencial de redução. E por consequência, transformará espécies

instáveis em compostos de menor estado entrópico. Além disso, o desgaste corrosivo pode acontecer, por exemplo, de maneira localizada, intergranular, por estresse ou por ataque de pH. Porém, metais capazes de formar camadas passivadoras são menos suscetíveis a sofrer essas corrosões (Callister, Jr., 2008, p.680).

E para o desgaste triboquímico, esse ocorrerá caso houver ação conjunta entre remoção de material e reações químicas corrosivas. Pois, remover as asperezas propiciará superfícies livres de óxidos protetores, o que torna possível o acontecimento de corrosão (Bhushan, 2013, p.359). Ainda sobre o mecanismo, Qiu et al. (2017) acrescenta que para camadas de óxidos menos resistentes ao cisalhamento e cuja cinética de formação for reduzida, maior será a taxa de desgaste.

Para esses dois métodos, Bardal (2003) afirma que elevadas temperaturas e umidade correspondem a fatores intensificadores de desgaste pois aumentam a dissolução e a transferência elétrica, o que altera a velocidade de corrosão. Além disso, a ausência de camada passivadora pode realçar o desgaste adesivo por expor porções energeticamente ativas dos materiais. E o desprendimento desses podem também agravar o desgaste abrasivo.

3.1.5 *Mecanismo de falhas em rolamentos*

- Superaquecimento

Booser (1997) indica que para esse tipo de falha os motivos resultam-se do aquecimento exacerbado proveniente de lubrificação inadequada, não apenas na quantidade insatisfatória de lubrificantes que por consequência aumenta drasticamente a fricção nos rolamentos, mas também pelo excesso desses que causam agitação, vazamentos e também por problemas metrológicos que se referem às folgas, pois caso essas forem inadequadas, poderá haver aumento da fricção entre os anéis do rolamento e conseqüentemente aumentar a temperatura interna. Já em relação ao mecanismo de falha, pode-se afirmar que haverá um nível de calor excessivo capaz de dilatar os elementos rolantes e, que por consequência, aumentará as tensões entre esses e os anéis. E como resultado, haverá deterioração da resistência à fadiga até acarretar o colapso por convulsão (Harnoy, 2003, pp. 42-43).

- Desgaste

Neale (2001) alega que o desgaste abrasivo pode levar à falha quando partículas não metálicas como sujeiras, areia, carbono ou outros contaminantes estão contidos em lubrificantes. E Booser (1997) complementa que além desses, há também fatores como falta de lubrificação e vibração capazes de intensificar o desgaste nos rolamentos. Sendo que para as vibrações, estas aumentam o choque entre asperezas, o que acarreta em desgastes severos (Harnoy, 2003, p.34)

Além disso, Booser (1997) acrescenta que desgastes corrosivos por pites e atrito também são comuns para rolamentos. E apresentam como motivos de falhas o excesso de corrente elétrica que flui através do material, o uso de lubrificantes contaminados por soluções ácidas e ambientes com elevada umidade e temperatura. E de acordo com Harnoy (2003) o mecanismo de desgaste por lubrificantes ocorre devido ao oxigênio e íons metálicos presentes nos lubrificantes catalisarem reações eletroquímicas que formam produtos corrosivos como ácidos. Os quais além de destruir as propriedades de lubrificação que, por conseguinte elevam a temperatura do rolamento, também atacam os metais desprotonando-os.

- Fadiga

Representa a falha mais ocorrente em rolamentos porque tem como causas principais falhas por excesso de calor, erros metrológicos, de montagem, corrosão, desgaste abrasivo e lubrificação inapropriada. E como discutido anteriormente, devido o contato rolante ser submetido por tensões alternadas e cíclicas, isso intensifica a falha por fadiga. E Harnoy (2003) aponta que além das tensões intermitentes, tensões centrífugas também são responsáveis pela redução da resistência à fadiga. E as formas mais recorrentes desse tipo de falha acontece por lascamentos (Neale, 2001). Além dessa, Jones (2011) também acrescenta que elevadas deformações plásticas em consequência de cargas excessivas e fissuras causadas por impacto por elementos rolantes contribuem para a falha catastrófica.

3.2 TRIBOLOGIA APLICADA AOS ROLAMENTOS

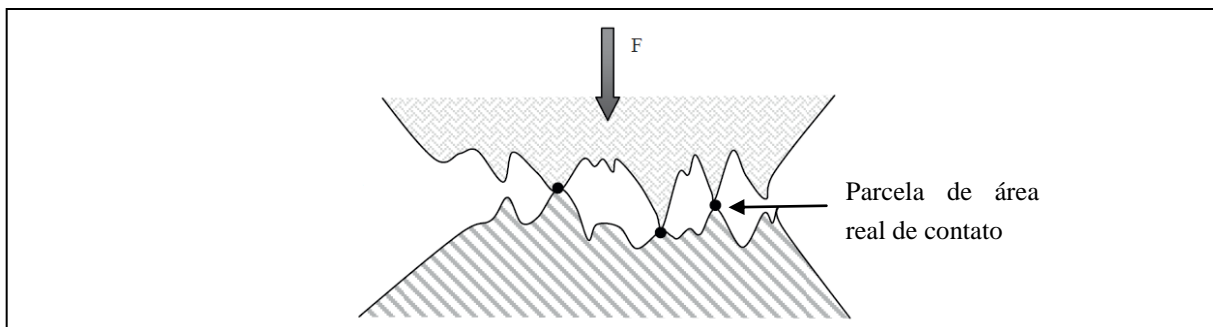
Corresponde a ciência que estuda as interações entre superfícies quando estas exibem movimento relativo. Além disso, analisa fricção, desgaste, lubrificação e o design de rolamentos. Assim, aplica-se nas indústrias em geral, de transportes, na geração de energia e

até na medicina. Isso, com o intuito de reduzir falhas e desperdícios energéticos e econômicos. Contudo, essa ciência não pode ter objetivos generalizados. Pois, há aplicações em que a fricção é desejada como, por exemplo, em sistemas de freios com o objetivo de dissipar energia cinética na forma de calor para desempenhar a função efetiva de frenagem. Já, por outro lado, o atrito pode ser indesejável, como em rolamentos, pois esse atenua o processo de desgaste que reduz a eficiência (Hutchings e Shipway, 2017, p.1).

3.2.1 Superfície

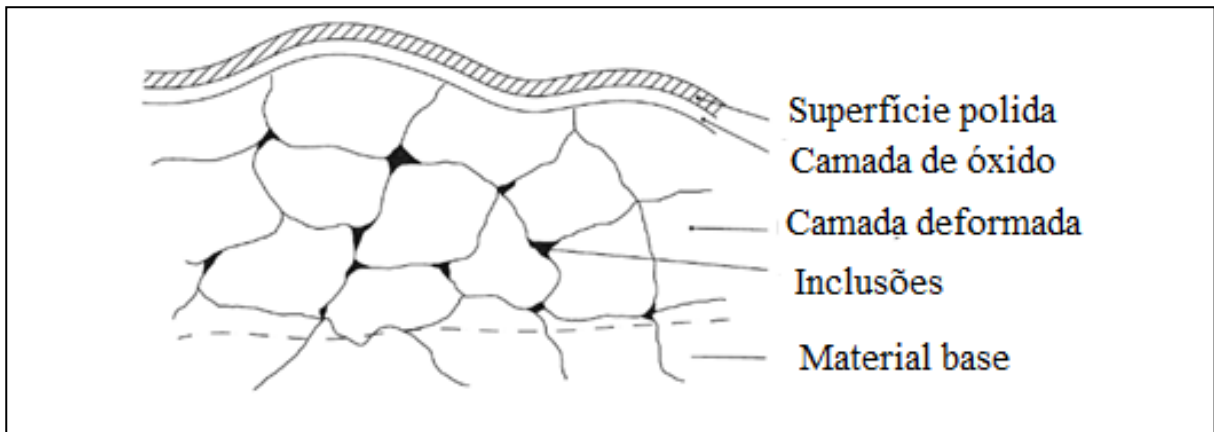
De acordo com Davim (2011), materiais que aparentam ser lisos, de fato não apresentam superfícies planas perfeitas, pois neles existem perfis topográficos constituídos por picos e vales que são determinados pelos processos de fabricação. E Gohar e Rahnejat (2018) afirmam que se caso as irregularidades apresentarem elevado comprimento de onda e protuberância, então a superfície poderá ser considerada rugosa. Além disso, para haver interações superficiais, essas dependerão da presença de contato físico efetivo e força compressiva (Figura 9).

Figura 9 - Duas superfícies em contato sob aplicação de força F de compressão.



Outro fator importante a se avaliar sobre o contato tribológico refere-se às características químicas e microestruturais das superfícies. Pois, há materiais capazes de produzirem revestimentos à base de óxidos cujas características físico-químicas são diferentes do corpo do material. O que os protegem, por exemplo, de interações adesivas com outras superfícies. E sobre as microestruturas, a figura 10 representa um modelo geral de superfícies de materiais. O qual considera a camada de topo com gases adsorvidos, em seguida uma camada frágil de óxidos, além de uma camada endurecida consequente do encruamento por conformações mecânicas, inclusões e a estruturas cristalinas do corpo do material (Bhushan, 2013, p.10).

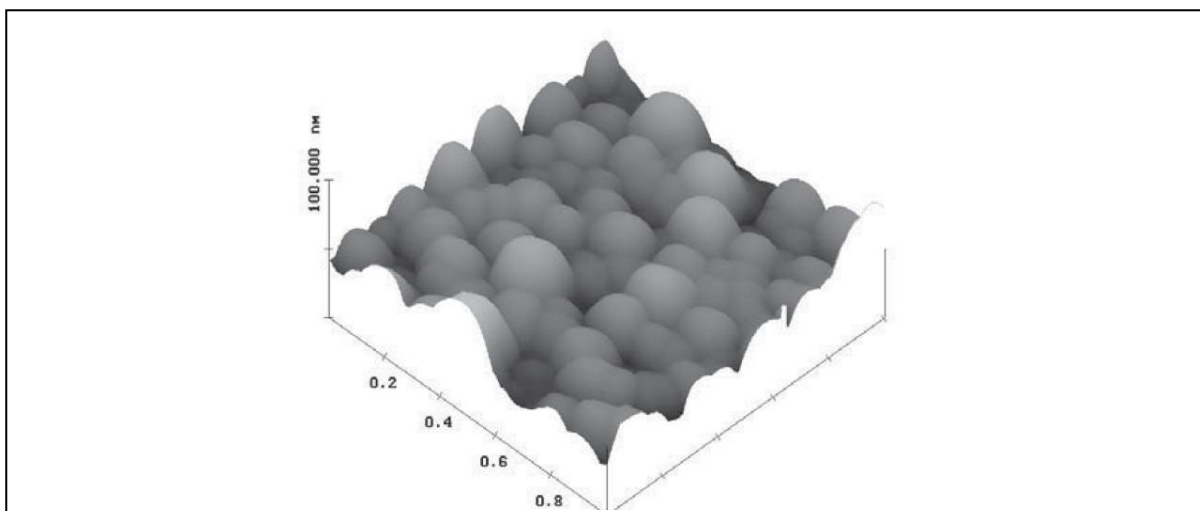
Figura 10 - Camadas superficiais em materiais.



Fonte: Adaptada de Davim (2011)

E retomando sobre topografia superficial, Hutchings e Shipway (2017) afirmam que existem métodos eficientes para avaliá-la. E esses compreendem, por exemplo, a perfilometria de contato e microscopia de força atômica (MFA). Sendo que esses métodos imprimem o perfil topográfico em gráficos 2D ou 3D a partir do uso de um aparato medidor, no qual há canetas diamantadas ou agulhas. A figura 11 representa um exemplo de um gráfico obtido via análise de MFA.

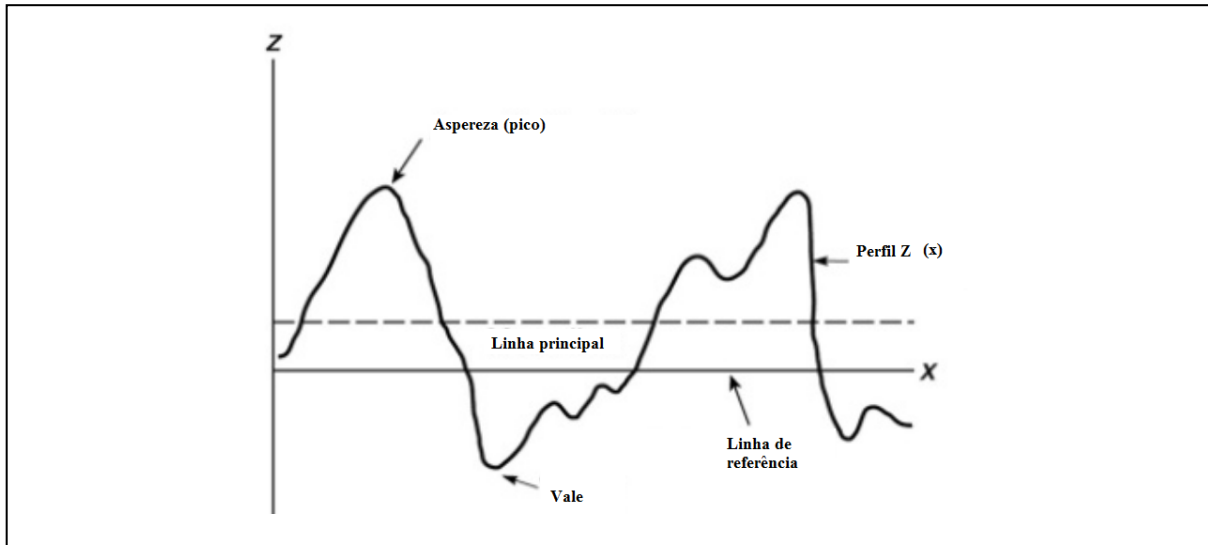
Figura 11 - Imagem de microscopia de força atômica de película de cobre.



Fonte: Takadoun (2008)

Além da representação gráfica do perfil topográfico, é necessário quantificar parâmetros de amplitude para determinar a variação de altitude de uma superfície relativa a um plano de referência (Bhushan, 2013, p.17). E a figura 12 evidencia o perfil padrão de referência para um perfil superficial.

Figura 12 - Perfil de superfície.



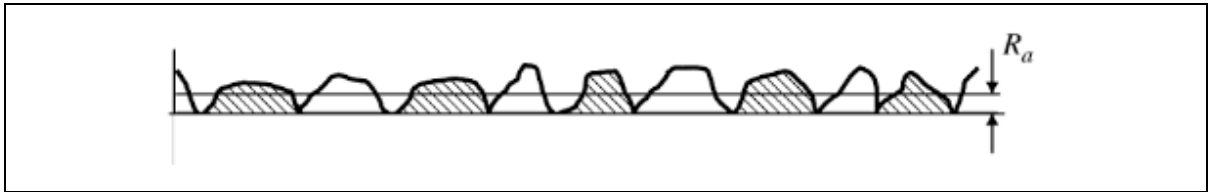
Fonte: Adaptado de Bhushan (2013)

Essa ilustração evidencia algumas regiões cruciais de análise. Como a aspereza que indica o maior pico apresentado. Por outro lado, e antagonicamente, tem-se o vale que indica a menor região adentro do material. E também existe a linha de referência X, a qual é determinada para delimitar uma profundidade de estudo topográfico do material de interesse. E por último, a linha principal que se localiza em uma região cuja área da região superior é igual a área da região inferior a ela. E após a análise da ilustração anterior, pode-se explorar o conceito de parâmetros de rugosidade, que se dividem em valores de amplitude e estatísticos. Os quais, de acordo com Gohar e Rahnejat (2017), permitem discutir em termos matemáticos as análises da perfilometria. E serão discutidos nas subseções seguintes.

3.2.2 Parâmetros amplitude

Bhushan (2013) determina que os parâmetros de amplitude referem-se às variações da altura de uma superfície relativa a um plano de referência. E eles são determinados pelos parâmetros: R_a , que determina a rugosidade média; R_q , conhecido como variância; R_t , que avalia a maior distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo; R_z , o qual avalia a média dos maiores comprimentos de picos e vales nos *cut-offs*. Assim, destaca-se que o primeiro parâmetro, R_a (figura 13), é o mais importante em análises topográficas de superfícies em materiais acabados, pois determina a altura média da linha principal para o perfil de rugosidade (Gadelmawla et al. p.133).

Figura 13 - Obtenção da rugosidade média em perfil de rugosidade.



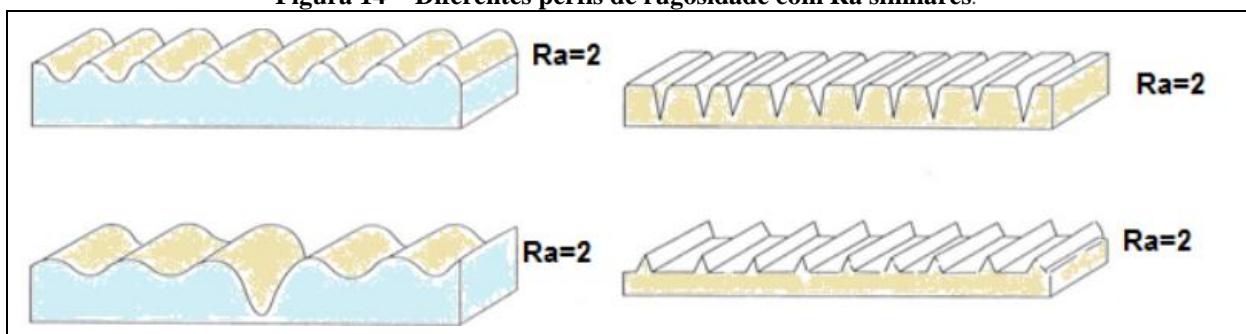
Fonte: Gohar e Rahnejat (2012)

E matematicamente, Willians (2005) após deduzir as equações e explicar o método de cálculo para obtenção dos valores dos parâmetros R_a e R_q , revelou que existe uma relação proporcional (Equação 1) entre esses parâmetros. Tal que: σ representa o desvio padrão e R_q a raiz quadrada da média aritmética do quadrado da variância da linha de referência.

$$R_q = \sigma \approx 1.25 R_a \quad (\text{Equação 1})$$

Dos parâmetros apresentados, ressalta-se a importância do R_a . Pois a partir desse, pode-se estimar o processo mecânico que um material foi submetido, como exemplificam Gohar e Rahnejat (2008), ao relatarem que para polimento a rugosidade média varia entre $0,1\mu\text{m}$ e $0,4\mu\text{m}$. Além disso, pode-se utilizar esse parâmetro para controlar o acabamento de produtos em linhas de produção. Porém, Petropoulos et al. (2010) argumentam que esse parâmetro possui algumas falhas como a não distinção entre picos e vales atípicos e também por não diferenciar o perfil de rugosidade. Assim, dois materiais podem possuir os mesmos valores de R_a e σ e apresentarem diferenças em formatos em irregularidades, frequências e distância entre picos e vales, como evidencia a figura 14.

Figura 14 - Diferentes perfis de rugosidade com R_a similares.



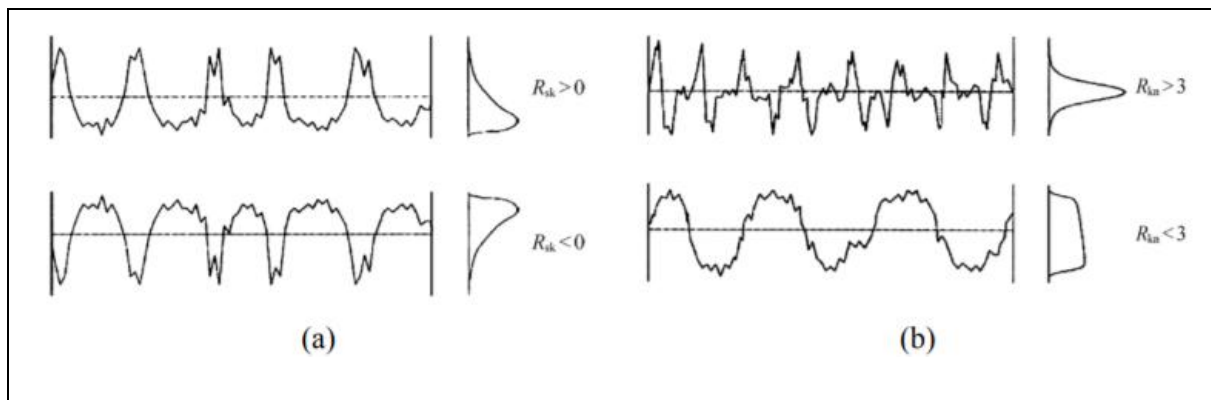
Fonte: Caracterização de texturas de superfícies (s.d.)

Dessa forma, faz-se necessário atribuir parâmetros adicionais aos perfis de rugosidade para caracterizar de forma mais adequada as superfícies. E para isso, utiliza-se os parâmetros estatísticos de rugosidade.

3.2.3 Parâmetros estatísticos de rugosidade

Estes parâmetros contêm melhores embasamentos científicos para caracterizar uma superfície. E destacam-se os parâmetros capazes de avaliar assimetria e curtose amostral. Os quais são avaliados, respectivamente, pelos parâmetros R_{sk} e R_{ku} . Este que mede o comprimento de onda dos picos referentes a um perfil de rugosidade. E aquele por considerar o afastamento simétrico do perfil de rugosidade (Petroupolos et al. 2010). A figura 15 ilustra o que esses parâmetros avaliam.

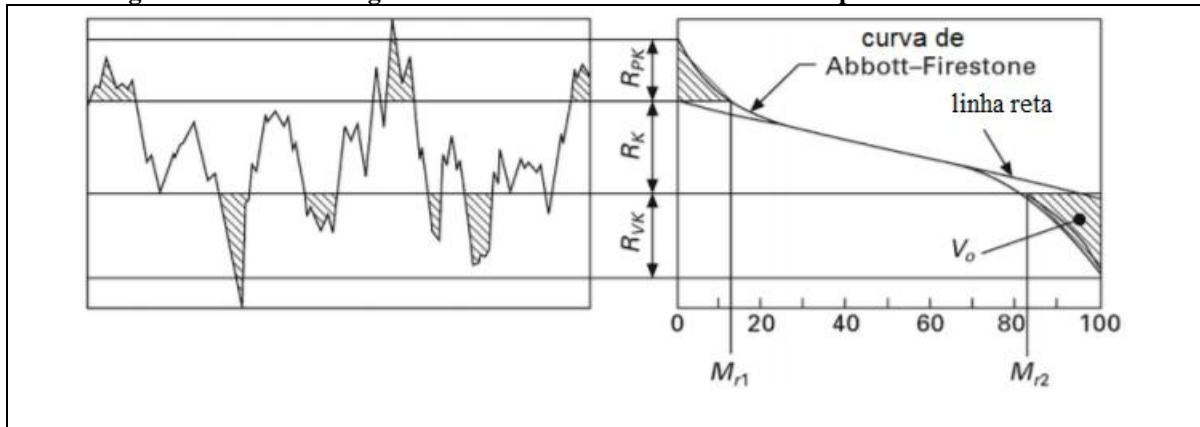
Figura 15 - Parâmetros estatísticos (a) R_{sk} Assimetria e (b) R_{ku} Curtose.



Fonte: Sória (2016)

Entretanto, representa-se o perfil de rugosidade em termos de parâmetros estatísticos por meio de uma função probabilística cumulativa, chamada de curva de Abbott-Firestone, ilustrada pela figura 16. A qual Petropoulos et al. (2010) afirmam que indica a quantidade de material presente abaixo ou acima de uma linha de referência. Além disso, essa curva determina área real de contato e também informa a proporção de material em qualquer nível de análise (Bhushan, 2002, p.38).

Figura 16 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott - Firestone e parâmetros descritivos.

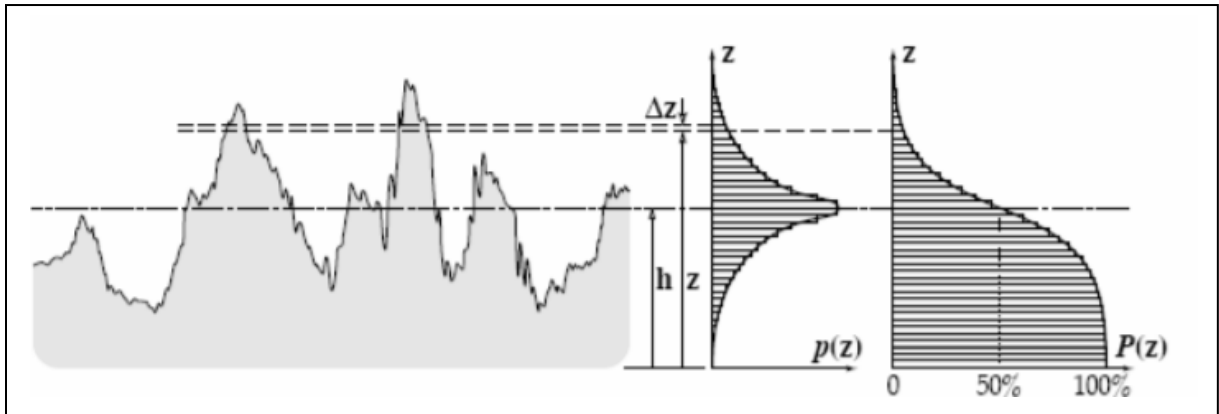


Fonte: Adaptado de Sória (2016)

Dos parâmetros presentes na curva de Abbott-Firestone, Majstorovic e Jakovljevic (2017) descrevem que a região R_k compreende uma área de rugosidade central. A qual tem relevância de ser analisada para previsões de desgaste. Pois, fornece informação sobre a quantidade de material que pode ser desgastado durante um processo operacional. Os autores também apresentam a região R_{pk} como região dos picos. Na qual expressa o volume de material que será removido durante processo de desgaste. Por outro lado, e antagonicamente à região anterior, tem-se R_{vk} , a qual determina a porção dos vales. E por essa região avalia-se a capacidade de retenção de líquido lubrificante. E por fim M_{r1} e M_{r2} . Este que considera a área capaz de suportar cargas. E aquele por caracterizar a fração de superfície consistente de picos abaixo da região central.

Além disso, as análises de rugosidade imprimem perfil de rugosidade com a respectiva curva de Abbot-Firestone, o qual é evidenciado pela figura 17. Sendo que nessa, a letra “z” corresponde a distância perpendicular ao plano da superfície e h a altura da linha média. Além disso, o eixo vertical do comprimento da curva de apoio está de acordo com a altura do pico mais alto ao vale mais profundo (0 a 100%) e a origem situa-se onde o pico da irregularidade é máximo (Dong, Sullivan e Stout, 1994).

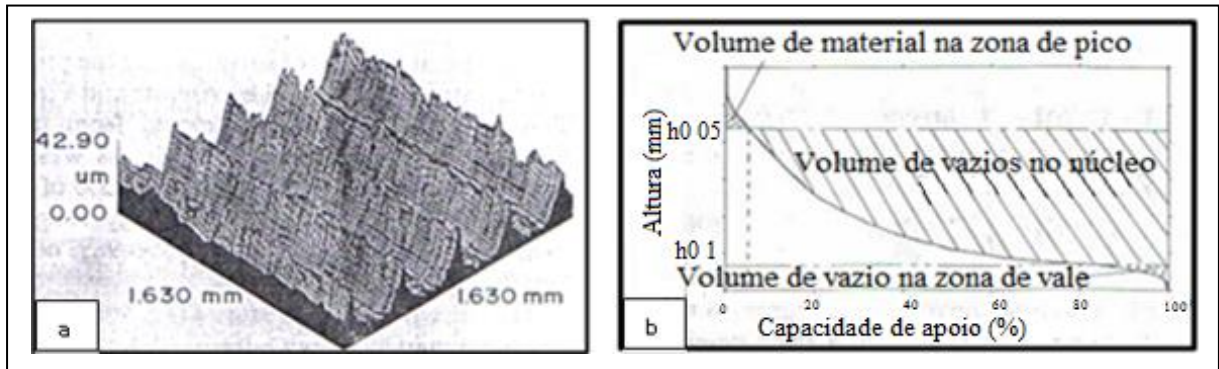
Figura 17 - Perfil de rugosidade, topográfico e curva de Abbot-Firestone.



Fonte: Thomas (1982)

E a figura 18 ilustra uma superfície típica de engenharia 18 (a) e sua respectiva curva de Abbot-Firestone 18 (b). As quais exemplificam uma superfície usinada por furação. E nota-se que essa apresenta arestas pontiagudas e elevado volume de vazios, que é característico da curvatura côncava na porção média da curva de Abbot-Firestone. Além disso, para essa topografia, os autores concluíram que a capacidade de apoio superficial é mínima devido à inclinação exibida pela curva. A qual para possuir elevada capacidade de apoio deve possuir menor inclinação da curva de Abbott-Firestone.

Figura 18 - a) Topografia de superfície e b) curva de Abbott-Firestone de peça usinada.



Fonte: Dong, Sullivan e Stout (1994)

3.3 METROLOGIA APLICADA AOS ROLAMENTOS

A metrologia é a ciência que estuda as medições e as tecnologias necessárias para averiguar as dimensões de um produto. E tal entendimento apresenta suma importância no que se refere à confiabilidade, credibilidade e ao atendimento dos requisitos técnicos desses insumos para eventual aprovação e controle de qualidade (Neto, 2012, p.18). Além disso, Albertazzani e Souza (2008) afirmam que na indústria mecânica o adequado controle

metrológico é responsável por agregar valor aos produtos por acrescentar informações no desenvolvimento de projetos, os quais determinam as especificações geométricas, ao processamento para viabilizar a construção do produto final, até passar pela análise metrológica com o intuito de realizar o controle geométrico e qualitativo. Dessa forma, no universo dos rolamentos, as medições se tornam necessárias para monitorar grandezas, controlar especificações e investigar as características dimensionais desses elementos de máquina.

3.3.1 *Análise geométrica*

E no que tange à qualidade, Sousa (2003) afirma que deve-se certificar que produtos manufaturados destinados aos sistemas de rolagem possuam padrões geométricos e tolerâncias dimensionais a serem cumpridos para evitar desvios capazes de limitar o funcionamento do conjunto de peças. Como problemas de montagem, falha prematura, desempenho reduzido, desvalorização da marca no mercado e recall de produtos. E ao considerar os rolamentos, de acordo com Viitala et al. (2019), deve-se adotar prevenções desses desvios. Porque erros geométricos podem causar vibrações perigosas em frequências proporcionais à frequência de rotação de rotores. As quais, quando exacerbadas podem ampliar a intensidade de forças cíclicas nos sistemas de rotação, o que reduz o tempo de vida de componentes mecânicos por viabilizar falha catastrófica por fadiga.

Assim, dentre os desvios mais comuns encontrados para rolamentos incluem-se erros dimensionais e geométricos. Dentre estes, os dimensionais se enquadram dentro de um limite de afastamento superior e inferior. E exemplifica-se o desvio de largura encontrado ao medir as peças. Já os desvios geométricos, como o de posicionamento da peça, incluem, por exemplo a concentricidade, que avalia a coincidência entre eixos circulares ao longo das sessões de uma peça. Há ainda desvios geométricos que envolvem a forma, a exemplo da circularidade, que avalia se um círculo se encontra entre dois círculos coplanares e concêntricos. Além disso pode haver erros referentes à orientação, por exemplo do ângulo do cilindro, que mensura a inclinação da peça sobre um plano (ISO 1101 2017 pp. 84-101). Nesse contexto, Guyer Jr. (1996) afirma que outros desvios de tolerância podem se relacionar também aos espaçamentos de folga, que devem ser adequados para evitar acúmulo de pressão durante movimento rotacional, o que se relaciona diretamente ao adequado diâmetro dos elementos rolantes entre as capas internas e externas. O autor ainda destaca que todos os erros

referentes às tolerâncias podem afetar no comportamento operante dos componentes por elevar atrito, vibrações, aderência e, conseqüentemente, intensificar o desgaste.

3.3.2 Tolerâncias dimensionais e geométricas em rolamentos

As tolerâncias dimensionais são normatizadas para rolamentos e essas referem-se às dimensões mensuráveis que esses elementos possuem. E ao considerar, por exemplo, os rolamentos radiais de uma carreira de esferas de classe de tolerâncias normais, essas normas evidenciam os limites toleráveis aos diâmetros e larguras dos anéis externo e interno. Assim, as tabelas 2 e 3 exibem os valores das tolerâncias dimensionais desses componentes dos rolamentos. Os quais são padronizados e exibidos na ISO 492.

Tabela 2 - Tolerâncias dimensionais para anel interno de rolamentos radiais.

Anel interno				
Diâmetro interno (mm)		Variação do diâmetro do furo (μm)		Variação da largura (μm)
>	\leq	Maior	Menor	Máxima
-	0.6	0	-8	12
0.6	2.5	0	-8	12
2.5	10	0	-8	15
10	18	0	-8	20
18	30	0	-10	20
30	50	0	-12	20
50	80	0	-15	25

Fonte: Adaptado de ISO 492 (2002)

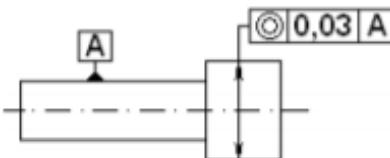
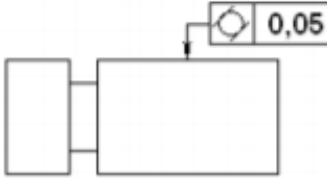
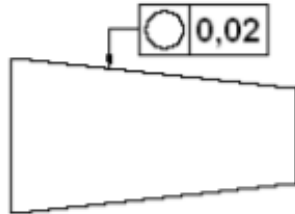
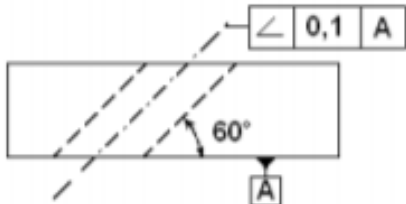
Tabela 3 - Tolerâncias dimensionais para anel externo de rolamentos radiais.

Anel externo				
Diâmetro externo (mm)		Variação do diâmetro do furo (μm)		Variação da largura (μm)
>	\leq	Maior	Menor	Máxima
-	2.5	0	-8	12
2.5	6	0	-8	15
6	18	0	-8	20
18	30	0	-9	20
30	50	0	-11	20
50	80	0	-13	25

Fonte: Adaptado de ISO 492 (2002)

Por outro lado, têm-se também os erros de forma que são apresentados pela norma ISO 1101. Esta que evidencia o tipo de tolerância, característica, simbologia e a representação em desenhos técnicos. Dessa forma, o quadro 1 evidencia as principais tolerâncias geométricas de análise em rolamentos e suas respectivas ilustrações e descrições.

Quadro 1 - Tolerâncias geométricas e indicações em desenhos.

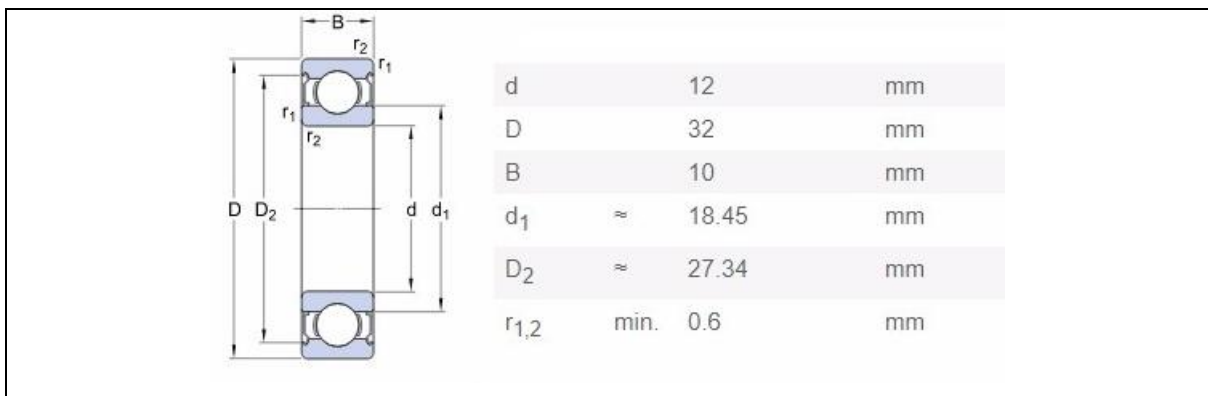
Tipo de tolerância	Característica a tolerar	Codificação em desenho	Descrição
Tolerância de posição	Concentricidade		O centro do círculo maior deve estar contido em um círculo com diâmetro de 0,03 mm, concêntrico ao círculo A.
Tolerância de forma	Cilindricidade		A superfície cilíndrica deve estar compreendida entre dois cilindros coaxiais, com diferença nos raios de 0,05 mm.
Tolerância de forma	Circularidade		O campo de tolerância limita-se por dois círculos concêntricos e distantes 0,02 mm.
Tolerância de orientação	Inclinação		O eixo do furo precisa situar-se entre dois planos distanciados por 0,1 mm e paralelos a um plano inclinado de 60° em relação ao plano de referência.

Fonte: Adaptado de ISO 1101 (2004)

4 METODOLOGIA

Foram adquiridos dois rolamentos do tipo 6201, de uma carreira de esferas, dos fabricantes SNR e GBR com diferença de 100% de valor de mercado. O rolamento apresenta dimensões padronizadas de acordo com o sistema básico de designação de rolamentos conforme a DIN 625-1. E os rolamentos serão designados como A e B de forma aleatória. A figura 19 representa as dimensões deste rolamento.

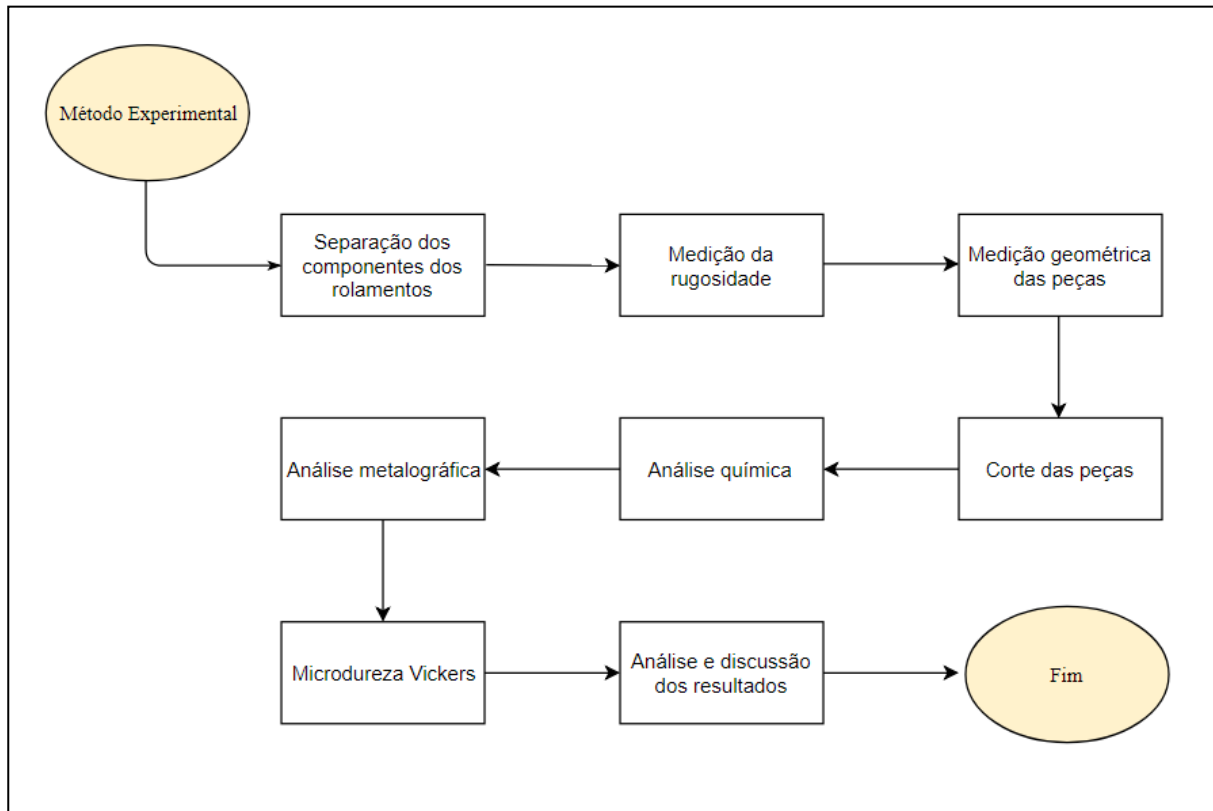
Figura 19 - Dimensões de rolamentos 6201.



Fonte: Adaptada de Deep Groove Ball Bearings FAG Generation C (2017)

Os rolamentos foram desmontados com cuidado para não danificar as regiões que seriam analisadas, nas quais foram realizados ensaios de rugosidade, dimensional, geométrico, metalográfico e microdureza Vickers. A análise química também foi realizada para comparar a composição química dos rolamentos. A figura 20 exhibe um fluxograma que esquematiza o procedimento experimental deste trabalho.

Figura 20 - Fluxograma da metodologia referente ao procedimento experimental.

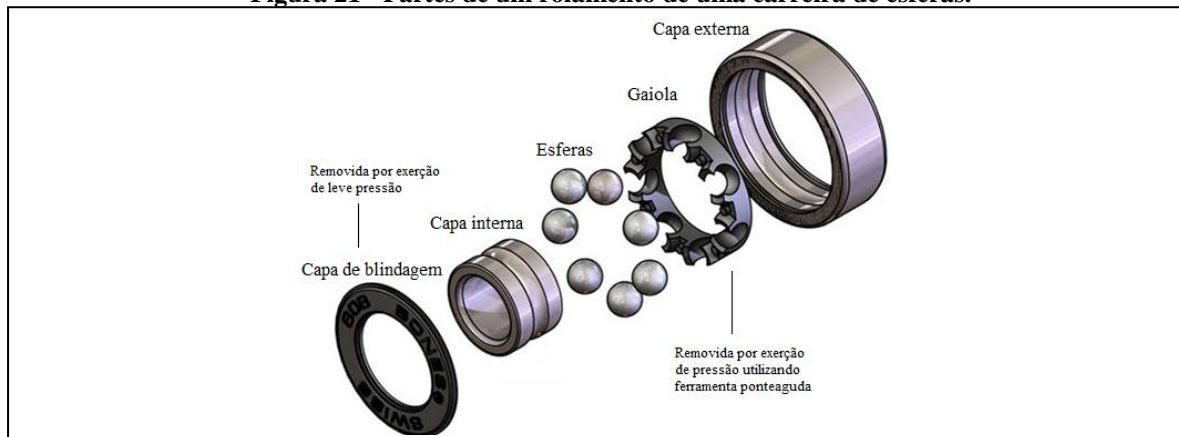


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 DESMONTAGEM DOS ROLAMENTOS

Os rolamentos foram desmontados no laboratório de usinagem do departamento de engenharia de materiais do CEFET-MG campus I. Local onde retirou-se a capa de blindagem do rolamento. Em seguida, as esferas foram retiradas e separadas em recipientes identificados. A figura 21 ilustra as partes obtidas após a desmontagem do rolamento.

Figura 21 - Partes de um rolamento de uma carreira de esferas.



Fonte: Adaptada de spinnermint.com (sd)

4.2 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

A rugosidade foi avaliada utilizando um rugosímetro de contato portátil RUGOSURF 20 da marca Tesa, o qual está ilustrado na figura 22.

Figura 22 - Rugosímetro portátil utilizado na medição de rugosidade.



Fonte: Precision Measuring Instruments (2016)

O rugosímetro foi posicionado em uma superfície plana, conforme ilustrado na figura 23, com ausência de perturbações. E foi realizado três leituras de rugosidade da capa externa e das regiões de maior e menor diâmetro da capa interna das amostras, as quais precisaram ser fixadas com adesivo para não se moverem durante as leituras. Além disso, validou-se os parâmetros de amplitude:

- Ra
- Rq
- Rt
- Rz

E os parâmetros estatísticos:

- Rsk
- Rku

As configurações para avaliar a rugosidade foram *cut-off* de 0,25mm e comprimento de amostragem de 1,375mm.

Figura 23 - Posicionamento do rugosímetro portátil e método de fixação durante medição da rugosidade da pista da capa interna.



Fonte: Fotografado pelo autor.

4.3 ANÁLISE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICA

A análise dimensional e geométrica foi realizada no laboratório de metrologia do departamento de engenharia mecânica na PUC Minas Belo Horizonte. Onde mediu-se três valores de dimensões e geometrias efetivas dos elementos para cada parâmetro com o auxílio de uma tridimensional da marca Mitutoyo modelo BR- M443 (figura 24), regida pela norma ISO 10360-2. A figura 24 evidencia os componentes gerais da máquina que é constituída por uma mesa, guias móveis, estação de leitura de escala, apalpador óptico e computador com unidade de entrada manual.

Figura 24 - Máquina de medir por coordenadas do laboratório de metrologia da PUC Minas.



Fonte: Fotografado pelo autor.

Foram coletados dados referentes à largura, diâmetro interno, diâmetro externo, ângulo entre plano e cilindro, circularidade e concentricidade das capas externas e internas. E

também coletou-se dados geométricos que especificaram os diâmetros das esferas dos elementos rolantes dos rolamentos.

4.4 ANÁLISE QUÍMICA

As capas internas e externas dos rolamentos foram cortadas em uma cortadora metalográfica Arocor 80 da marca Arotec. A qual encontra-se no laboratório de metalografia do DEMAT, CEFET-MG. E após cortadas, seis amostras foram submetidas à análise química no laboratório de caracterização e microscopia do DEMAT, CEFET-MG. Onde foi realizado o método fluorescência de raios X, à vácuo na máquina Shimadzu modelo EDX- 720, com o intuito quantificar porcentagem de elementos químicos presentes nas capas internas e externas e nas esferas dos rolamentos.

4.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

4.5.1 *Microscopia óptica*

As amostras das capas externas, internas e esferas foram embutidas a quente com baquelite na prensa de embutimento PRE-30Mi da Arotec no laboratório de metalografia do DEMAT, CEFET-MG. Onde, em seguida, lixou-se as amostras em lixas de carboneto de silício de 120#, 240#, 300#, 400# e 600# com resfriamento e lubrificação por água. Depois essas foram polidas em panos com pasta de diamante de 9 μ m, 3 μ m e 1 μ m respectivamente. E após o preparo superficial, as amostras foram atacadas com nital 3%, em torno de 5s. E realizou-se a análise metalográfica em microscópio óptico no laboratório de metalografia no departamento de engenharia mecânica da PUC MINAS.

4.5.2 *Microdureza Vickers*

Esse procedimento foi realizado no microdurômetro Vickers Shimadzu modelo HV-1, regido pela norma ASTM E384-11 e constituído de sistema de magnificação de 400X, o qual encontra-se no laboratório de metalografia do DEMAT, CEFET-MG campus I. Onde realizou-se cinco penetrações em regiões distintas de cada parte dos rolamentos. E os parâmetros utilizados durante ensaio foram carga de 4.903N em tempo de 15s.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

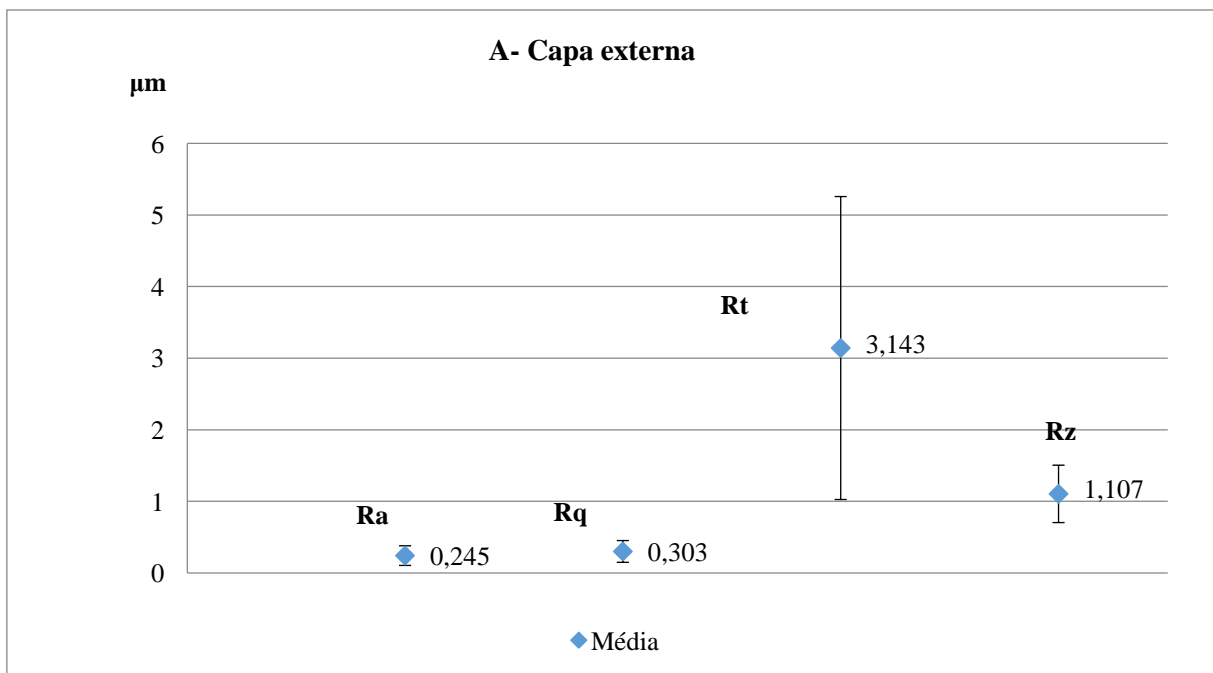
5.1 RUGOSIDADE

Os resultados obtidos pela análise de rugosidade com o rugosímetro portátil se encontram nas sequências de gráficos e imagens a seguir. Os quais evidenciam os valores obtidos de R_a , R_q , R_t , R_z , perfil de rugosidade e curvas de Abbott-Firestone. Esses que são necessários não só para se discutir sobre o acabamento superficial das amostras, como também a compará-las. A discussão foi elaborada individualmente pelas amostras A e B e posteriormente descrito a comparação entre eles.

5.1.1 *Capa externa*

Para o rolamento A, o gráfico 1 demonstra que o R_a médio da capa externa deste rolamento apresentou valor médio de $0,245\mu\text{m}$ e desvio padrão de $0,11\mu\text{m}$. E os espectros bidimensionais estão ilustrados na figura 25.

Gráfico 1 - Resultados do rugosímetro para a capa externa do rolamento A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Curvas de perfil da capa externa do rolamento A.

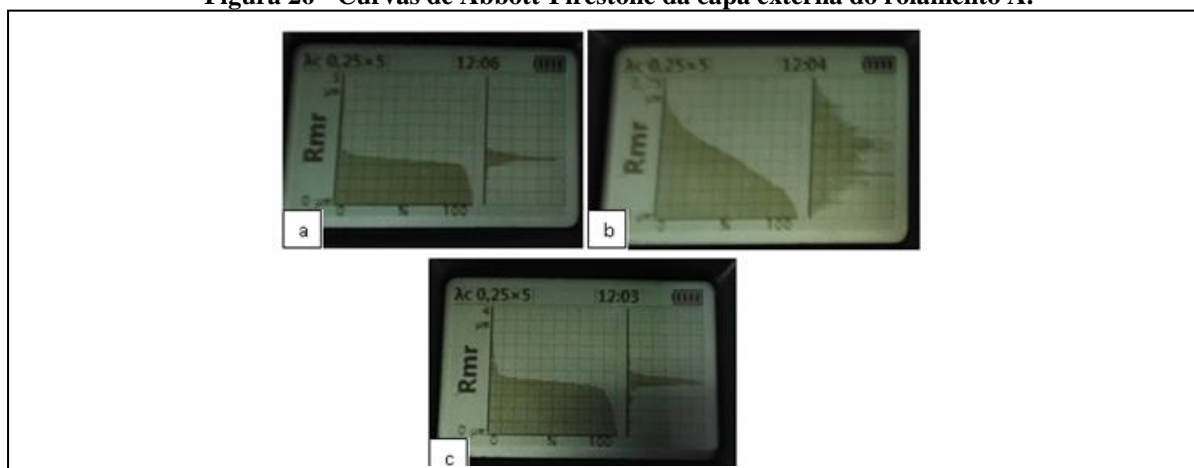


Fonte: Fotografado pelo autor.

O R_q médio apresentou valor de $0,303\mu\text{m}$ e desvio padrão de $0,12\mu\text{m}$, corroborando com a relação proporcional definida na equação 1. O valor médio de R_t foi de $3,143\mu\text{m}$, ou seja, aproximadamente treze vezes o valor de R_a . E este efeito demonstra que há picos ou há vales com amplitudes relevantes que necessitam ser avaliados. E para avaliar se existe repetibilidade desta discrepância, avaliou-se o R_z que apresentou média de $1,107\mu\text{m}$ e desvio padrão de $0,33\mu\text{m}$, sendo assim, é possível conduzir a análise para uma superfície não homogênea, com afastamento entre picos e vales na ordem aproximada de cinco vezes R_a , porém em algum ponto da superfície existe algum defeito que ocasionou a elevação do valor de R_t , talvez seja pela falta de controle do processo de acabamento durante a fabricação desta superfície. E esse fenômeno pode ser observado nas imagens ilustradas na figura 25, sendo que 25(a) apresenta superfície mais homogênea e a 25(b) e 25(c) evidenciam a discrepância entre picos e vales em trechos de varredura na superfície do elemento da capa externa.

Além desses resultados, deve-se também analisar as curvas de Abbott-Firestone para melhor interpretação do perfil topográfico de estudo. E essas estão ilustradas pela figura 26.

Figura 26 - Curvas de Abbott-Firestone da capa externa do rolamento A.

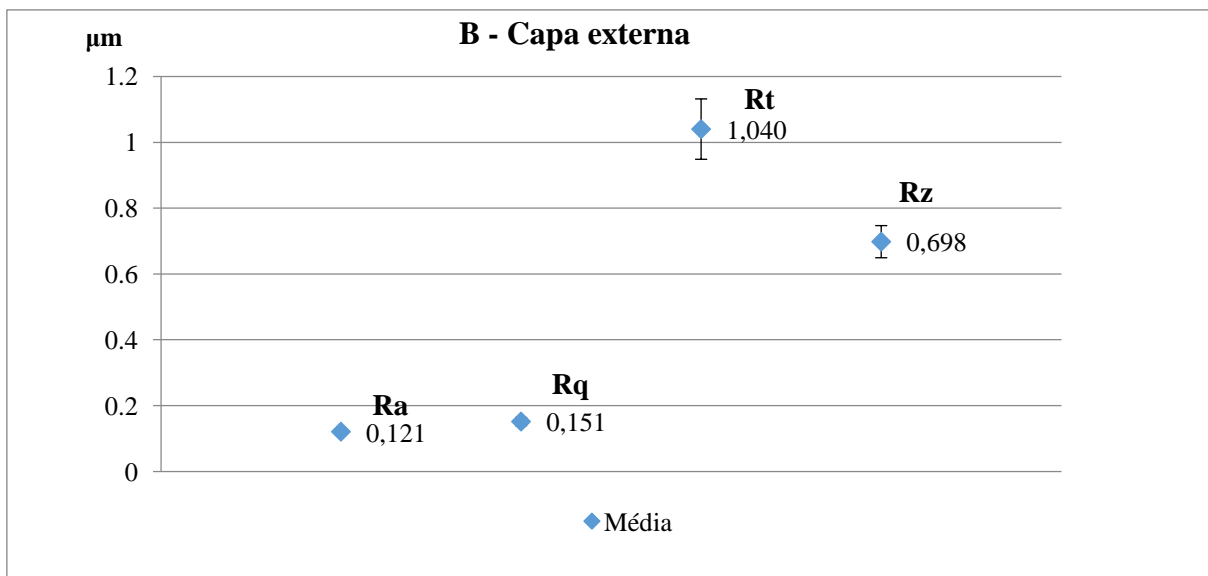


Fonte: Fotografado pelo autor.

As curvas de Abbott-Firestone 26(a) e (c) apresentaram uma pequena fração de picos e vales em relação à rugosidade central R_k . Além disso, essas amostras possuem uma superfície com maior área de contato comparado à superfície da figura 26(b), que apresenta uma curva inclinada apresentando uma superfície com baixa resistência ao desgaste. E esse fenômeno ocorre por causa da área real de contato, sendo que para obter uma fração de 50% de apoio, a superfície da figura 26(b) precisa reduzir uma amplitude maior dos picos. O que pode acarretar perda dimensional significativa para o funcionamento do rolamento.

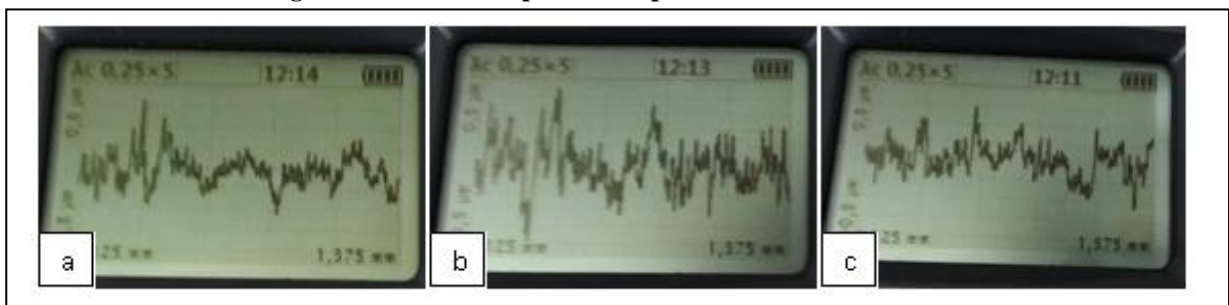
O gráfico 2 mostra os parâmetros de amplitude coletados da capa externa do rolamento B a partir da avaliação superficial feita pelo rugosímetro. E esse demonstra R_a médio $0,121\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,01\mu\text{m}$. E os espectros bidimensionais das curvas de perfil estão ilustrados na figura 27.

Gráfico 2 - Resultados do rugosímetro para a capa externa do rolamento B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Curvas de perfil da capa externa do rolamento B.

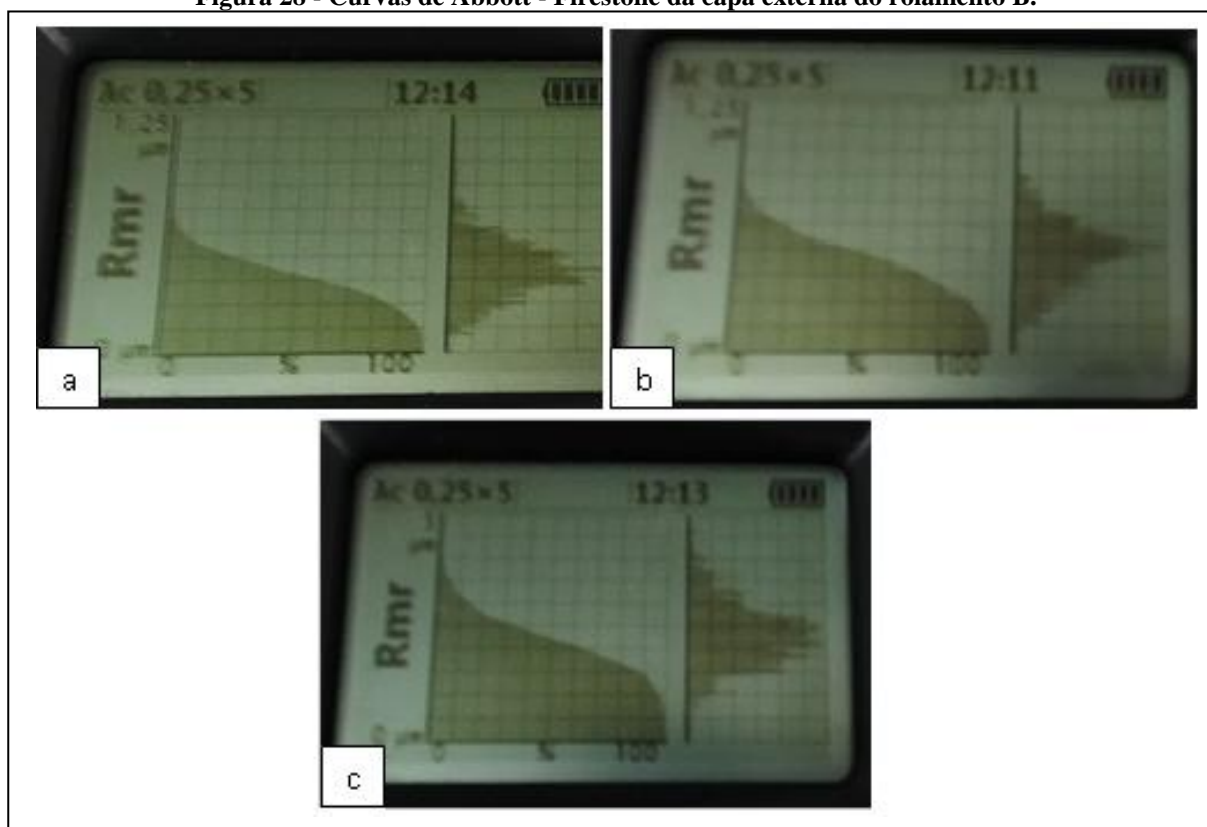


Fonte: Fotografado pelo autor.

O R_q apresentou valor médio de $0,151\mu\text{m}$, com desvio padrão de $0,01\mu\text{m}$ e encontra-se de acordo com a relação proposta pela equação 1. E o valor médio de R_t foi de $1,040\mu\text{m}$, com desvio padrão de $0,07\mu\text{m}$, e é aproximadamente nove vezes maior que o R_a , e isso evidencia que há picos ou vales relevantes que precisam ser averiguados. E para avaliar se há repetibilidade da discrepância entre os comprimentos de picos e vales, avaliou-se o R_z que apresentou valor médio de $0,698\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,04\mu\text{m}$. O que indica que a amostra apresentou homogeneidade superficial e que essa também exibiu afastamento entre picos e vales na ordem de nove vezes R_a . E ao observar as imagens obtidas pela figura 27 percebe-se que essas exibem perfis homogêneos. Porém, 27(a) e 27(b) ilustram perfis bidimensionais com picos e vales com valores mais acentuados à média de rugosidade se comparados à 27(c).

E para acrescentar mais informações a respeito da superfície analisada é necessário avaliar a curva de Abbott-Firestone dessas amostras. As quais encontram-se na figura 28:

Figura 28 - Curvas de Abbott - Firestone da capa externa do rolamento B.



Fonte: Fotografado pelo autor.

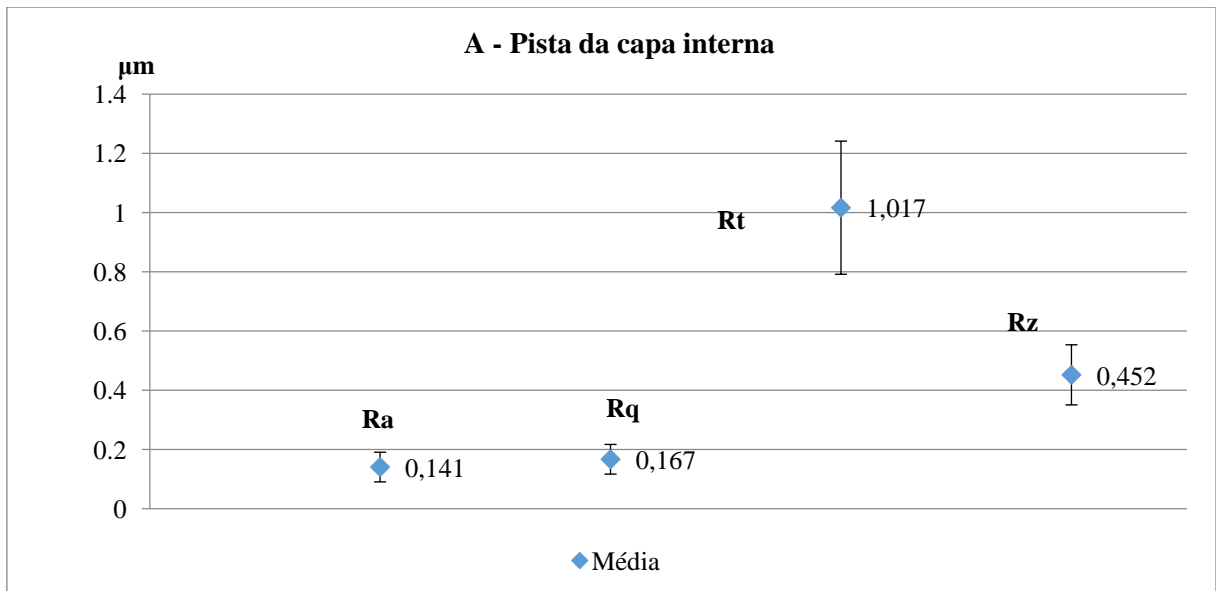
As curvas de Abbott-Firestone ilustradas apresentam características similares por exibirem frações significativas dos volumes de picos e vales em relação à rugosidade central

R_k . E no que se refere à área de contato, nota-se que a figura 28(a) exibe maior apoio superficial se comparada às figuras 28(b) e (c), que possuem curvas mais inclinadas. Além disso, a curva 28(c) evidencia o menor apoio e os maiores volumes de picos e vales, se comparada às outras curvas.

5.1.2 Capas internas: pista

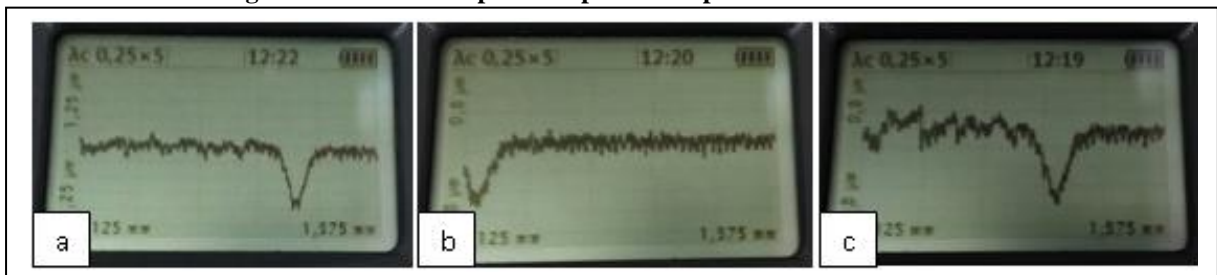
O gráfico 3 exibe os resultados obtidos pela análise de rugosidade da pista do anel interno do rolamento A. E esses demonstram que o R_a médio foi de $0,141\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,050\mu\text{m}$. E a figura 29 evidencia os espectros bidimensionais da amostra.

Gráfico 3 - Resultados do rugosímetro para a pista da capa interna do rolamento A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Curvas de perfil da pista da capa interna do rolamento A.



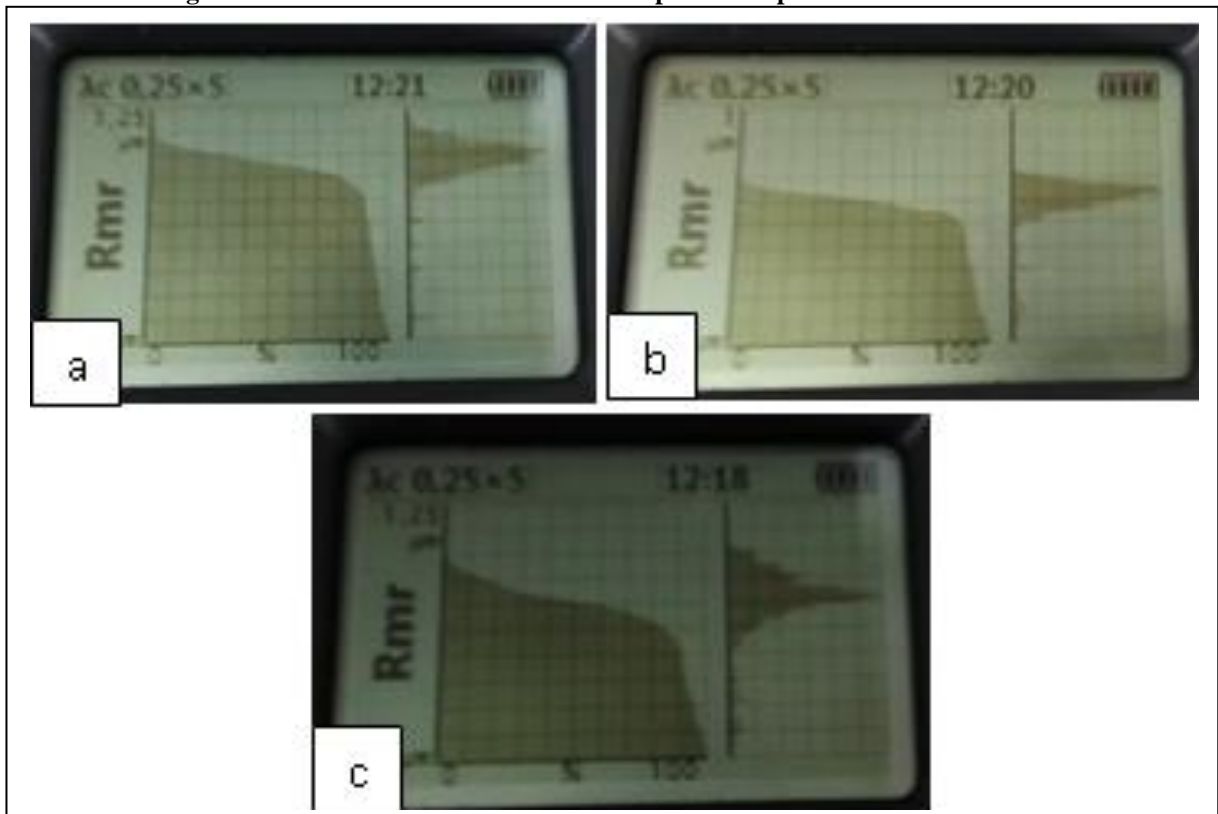
Fonte: Fotografado pelo autor

O R_q médio obtido foi de $0,167\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,050\mu\text{m}$. E esse resultado encontra-se de acordo com a equação 1. Além disso, o R_t médio foi de $1,017\mu\text{m}$ com desvio

padrão de $0,225\mu\text{m}$, ou seja, a média das maiores distâncias verticais encontradas correspondem a seis vezes o valor de R_a . O que indica que há picos ou vales de tamanhos relevantes em ser analisados. E o R_z apresentou valor médio de $0,452\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,102\mu\text{m}$, o que permite conduzir a análise a uma amostra de rugosidade não homogênea com afastamento entre picos e vales na ordem de três vezes R_a . Porém, a figura 29 indica que há vales muito profundos distribuídos ao longo dos comprimentos de amostra. O que fornece evidências de intencionalidade ao fabricante pois nota-se nas imagens que a confecção superficial desse rolamento teve controle adequado devido aos tamanhos regulares dos vales. Os quais são funcionais no anel interno pois contribuem com a retenção de lubrificante para minimizar o atrito entre a pista de rolagem e os elementos rolantes.

A figura 30 exibe as curvas de Abbot-Firestone com o intuito de acrescentar mais informações sobre a rugosidade da pista da capa interna.

Figura 30 - Curvas de Abbott-Firestone da pista da capa interna do rolamento A.



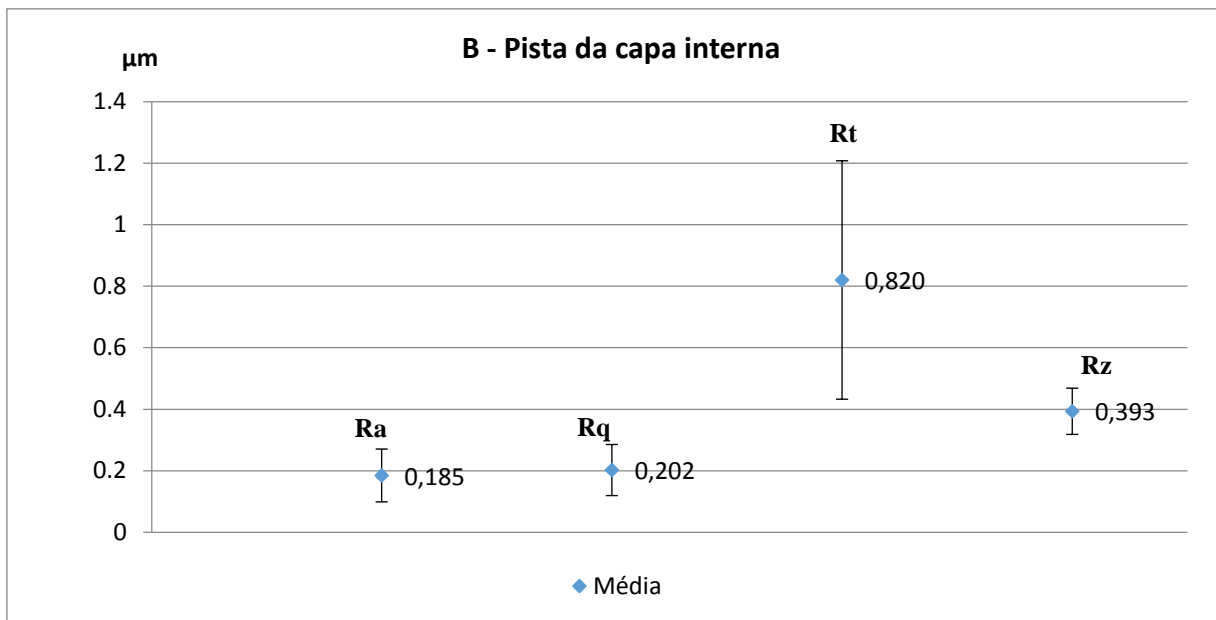
Fonte: Fotografado pelo autor.

As curvas obtidas apresentaram comportamentos similares. E constata-se que a figura 30(b) além de exibir maior capacidade de apoio também possui menor volume da região de picos. Enquanto a figura 30(a) possui maior quantidade de material em apoio de 50% do que

as outras curvas e 30(c) contém maior volume de picos. Assim, conclui-se que a pista da capa interna além de possuir elevado volume de vazios referentes aos vales profundos distribuídos na superfície, também possui resistência ao desgaste por possuir volume acentuado de material disponível a sofrer desgaste na região de apoio.

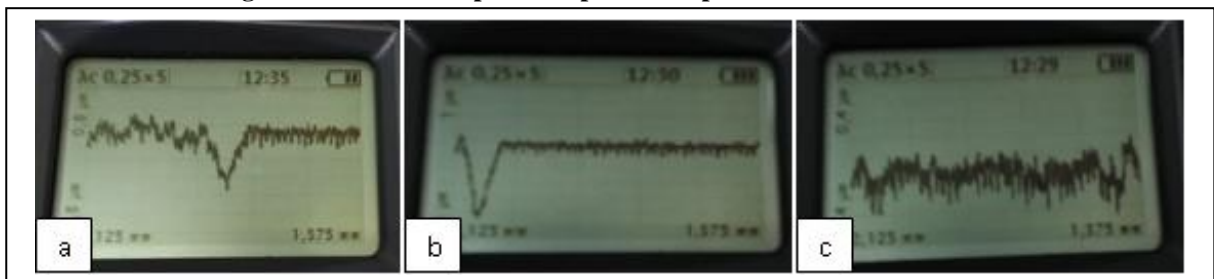
O gráfico 4 apresenta a média dos parâmetros de rugosidade impressos pelo rugosímetro para a pista da capa interna do rolamento B. A qual apresentou média do parâmetro R_a de $0,185\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,086\mu\text{m}$. E a figura 31 ilustra os perfis de rugosidade impressos pelo rugosímetro.

Gráfico 4 - Resultados do rugosímetro para a pista da capa interna do rolamento B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Curvas de perfis da pista da capa interna do rolamento B.



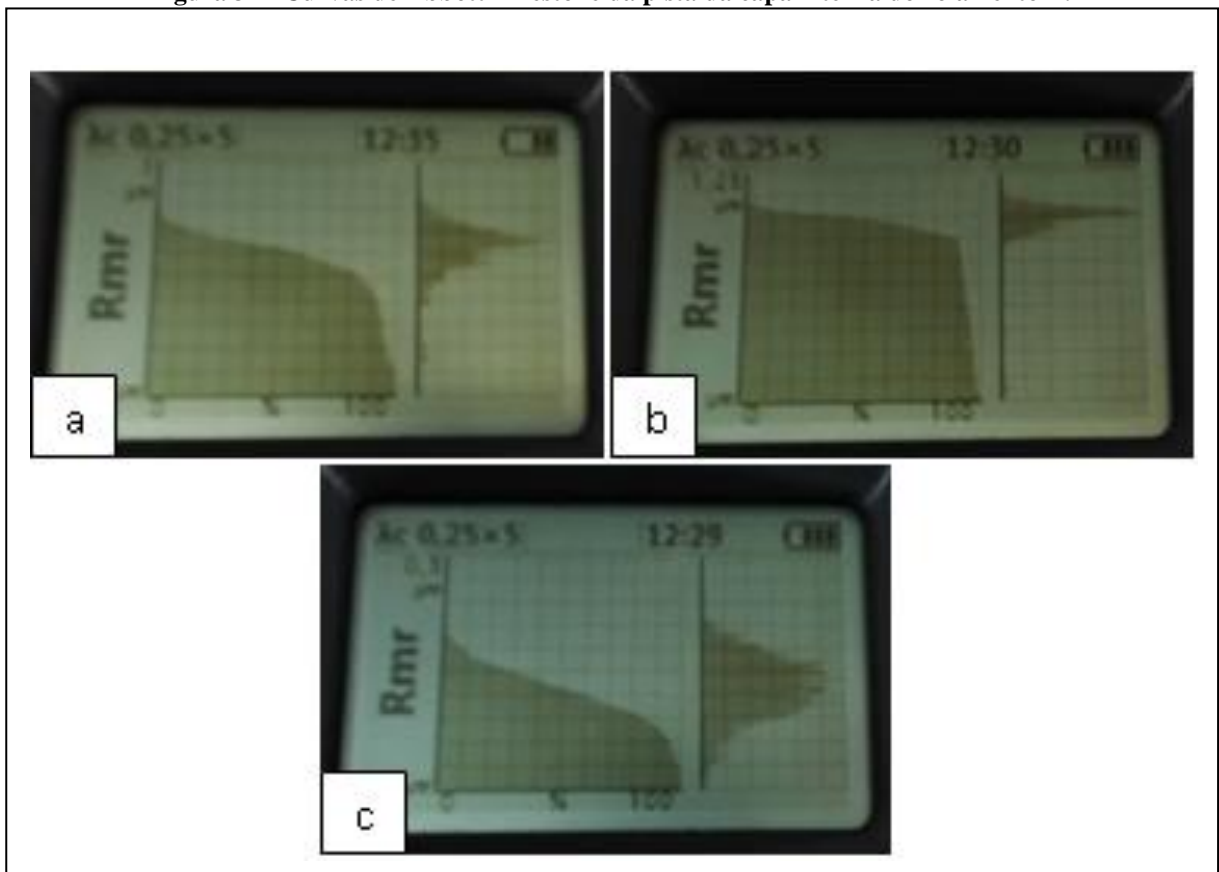
Fonte: Fotografado pelo autor.

O R_q médio obtido foi de $0,202\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,083\mu\text{m}$, corroborando a relação proporcional pela equação 1. E o valor médio de R_t de $0,820\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,387\mu\text{m}$ indica que a média dos maiores valores de distâncias verticais de picos e vales

correspondem a aproximadamente quatro vezes o valor de R_a . Além desses, obteve-se o R_z médio de $0,393\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,075\mu\text{m}$. E nota-se que essa superfície não é homogênea com afastamento de picos e vales na ordem de duas vezes R_a . Porém em alguns pontos de leitura detectou-se a presença de picos ou vales extensos. E ao observar as figuras dos espectros bidimensionais, percebe-se que existe vales profundos nas figuras 31(a) e (b), porém esses apresentam discrepância de comprimentos. Além disso, a figura 31(c) não evidencia a presença desses sulcos extensos. Ou seja, percebe-se que a amostra além de não possuir controle na dispersão dos vales profundos, também não há consistência dos tamanhos destes, o que pode acarretar em excesso de desgaste da pista do anel interno com as esferas devido à não retenção adequada de lubrificante.

E para garantir melhor análise dessa pista, foi obtido as curvas de Abbott-Firestone que se encontram representadas na figura 32.

Figura 32 - Curvas de Abbott-Firestone da pista da capa interna do rolamento B.



Fonte: Fotografado pelo autor.

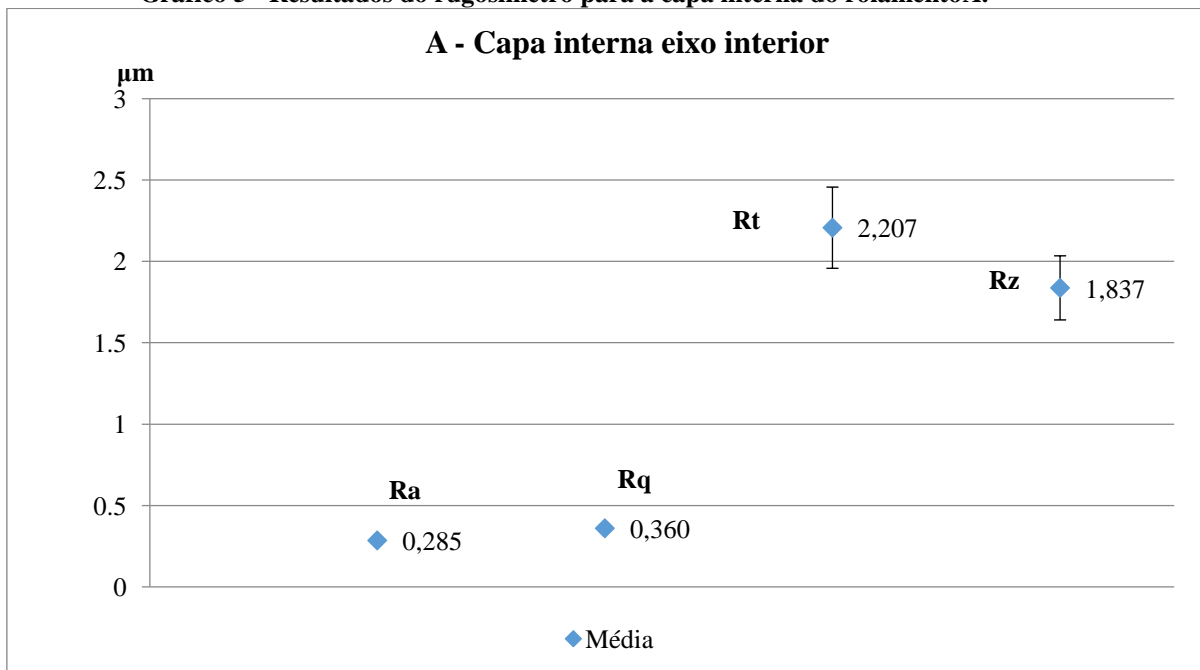
As curvas 32(a) e (b) evidenciaram frações elevadas de volumes de vales e resistência ao desgaste devido a grande quantidade de material presente na região de rugosidade média. Em oposição, tem-se a curva 32(c) que além de exibir menor volume de material na região de

rugosidade média, também ilustra maior volume de picos e reduzido volume de vales se comparada às outras curvas. Sobre o apoio, essa curva evidencia que a topografia apresenta menor capacidade de apoio do que as curvas 32(a) e (b) devido à maior inclinação da curva de Abbott-Firestone. Assim, avalia-se que a pista da capa interna do rolamento B além de apresentar regiões sulcadas com alta capacidade de apoio, também apresentam regiões ásperas com reduzida capacidade de apoio.

5.1.3 Capas internas: interior

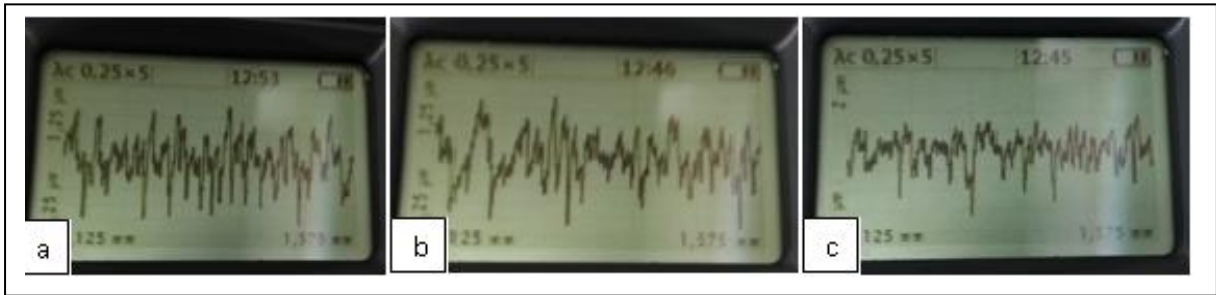
Os resultados de rugosidade do interior da capa interna do rolamento A estão evidenciados no gráfico 5. O qual apresenta R_a médio de $0,285\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,011\mu\text{m}$. E os espectros bidimensionais estão evidenciadas pela figura 33.

Gráfico 5 - Resultados do rugosímetro para a capa interna do rolamento A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Curvas de perfil da capa interna do rolamento A.

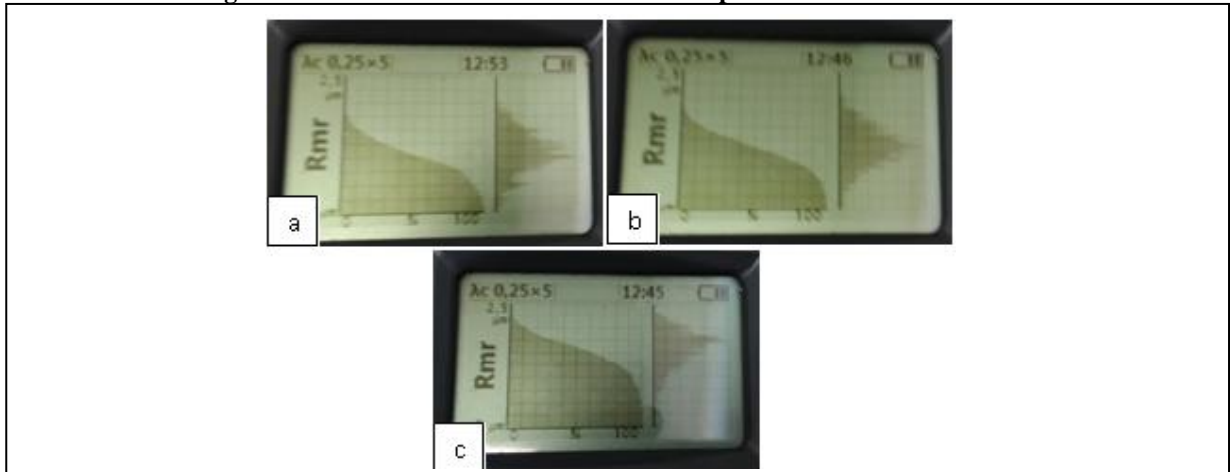


Fonte: Fotografado pelo autor.

A capa interna apresentou R_q médio de $0,360\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,019\mu\text{m}$, o que valida a relação proporcional da equação 1. E o valor médio de R_t corresponde a $2,207\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,249\mu\text{m}$ indicando que a média das maiores distâncias verticais equivalem a aproximadamente oito vezes a média de R_a . O que evidencia que há picos ou vales salientes que necessitam ser averiguados para determinar se há repetibilidade de discrepância de tamanhos. Para isso, verifica-se que a média de R_z foi de $1,837\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,197\mu\text{m}$, ou seja, isso prova que há picos e vales de tamanhos relevantes na amostra e que o afastamento entre essas estruturas está na ordem de seis vezes R_a . A figura 33 corrobora as observações visto que as curvas de perfil contêm regiões de vales e picos maiores que a média de rugosidade. Porém, essas não estão distribuídas de maneira aleatória nas curvas e isso indica que houve controle do acabamento superficial durante processamento dessa estrutura.

No entanto, para melhor interpretação dos resultados é necessário avaliar a figura 34, na qual estão evidenciadas as curvas de Abbott-Firestone da região interior capa interna.

Figura 34 - Curvas de Abbott-Firestone da capa interna do rolamento A.

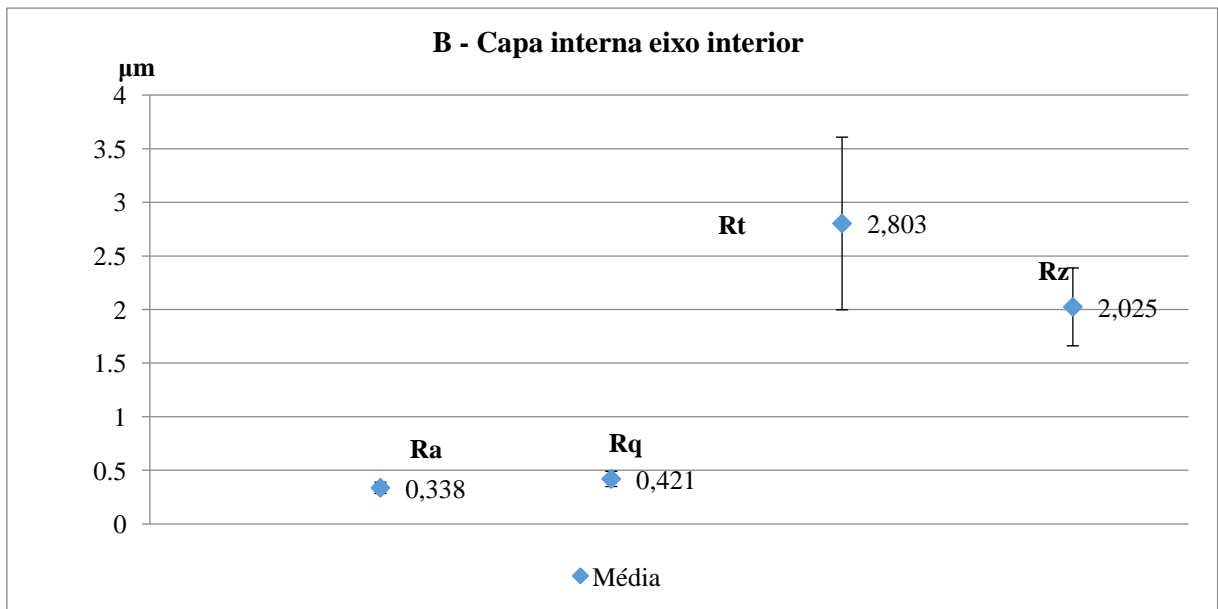


Fonte: Fotografado pelo autor.

As curvas de Abbott-Firestone da figura 34 evidenciaram frações de picos e vales em relação à rugosidade central. E a diferença entre essas imagens é que a figura 34(c) exibe maior volume de picos, vales e maior porção de material na região de rugosidade central do que as curvas das figuras 34(a) e (b). No entanto, estas curvas apresentam maior capacidade de apoio do que a curva da figura 34(c).

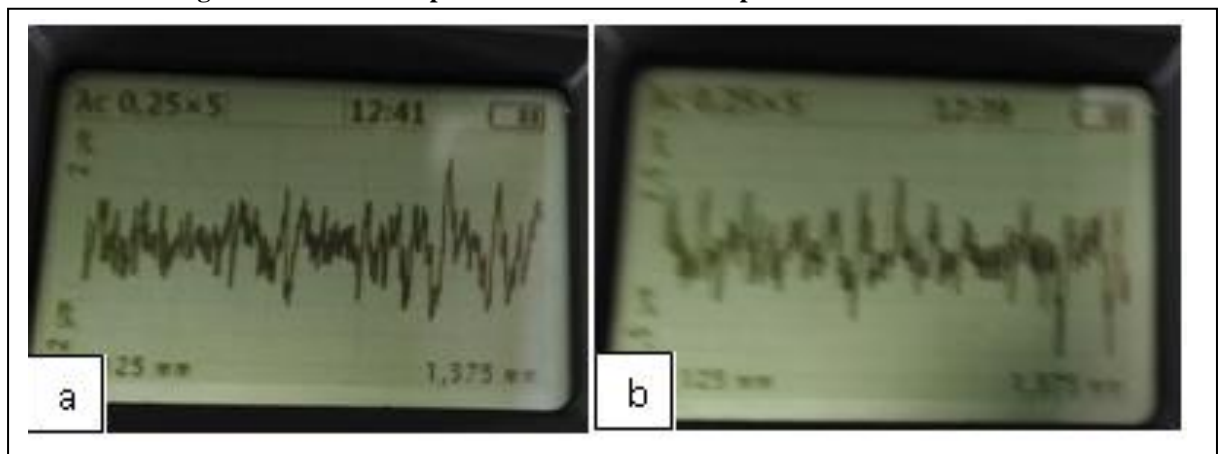
Por outra análise, tem-se também os resultados de rugosidade do eixo interior do anel interno do rolamento B, os quais estão exibidos no gráfico 6. Os resultados indicam que o R_a médio mediu $0,338\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,052\mu\text{m}$. E os espectros bidimensionais do perfil dessa região estão evidenciadas na figura 35.

Gráfico 6 - Resultados do rugosímetro para a capa interna do rolamento B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Curvas de perfil do eixo interior da capa interna do rolamento B.

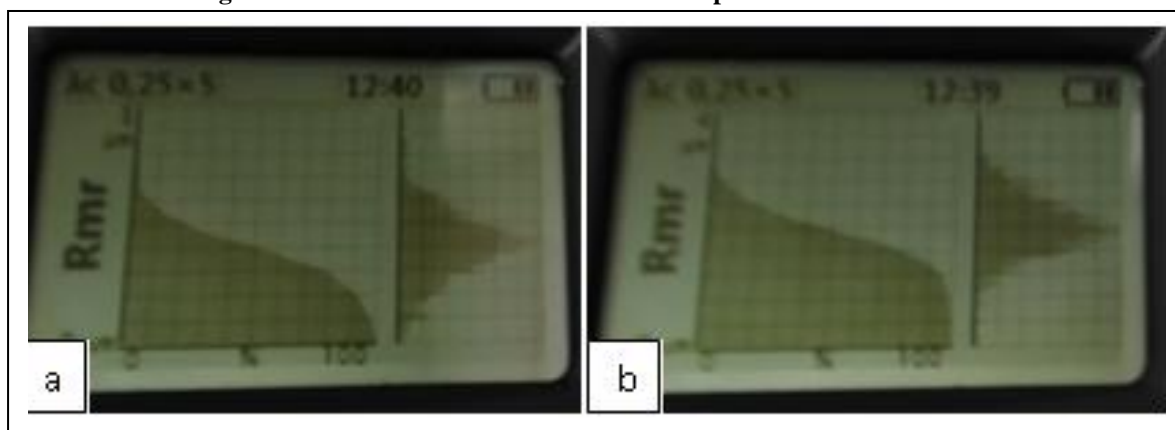


Fonte: Fotografado pelo autor.

O R_q médio foi de $0,421\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,071\mu\text{m}$, e esse valor indica que está de acordo com a relação proposta pela equação 1. Já referente ao R_t médio, quantificou-o com $2.803\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,805\mu\text{m}$. Ou seja, o maior valor encontrado de distância vertical é equivalente a oito vezes o R_a médio indicando que há picos ou vales de tamanhos relevantes a serem analisados. E para averiguar se houve repetibilidade desses, avaliou-se R_z médio, que foi de $2,025\mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,363\mu\text{m}$ e isso revela que é possível conduzir a análise para uma superfície homogênea, com afastamento entre picos e vales na ordem aproximada de seis vezes R_a . Assim, é possível afirmar que os comportamentos das curvas de perfil dessa amostra evidenciam as mesmas peculiaridades que a da amostra anterior. Pois elas exibem regiões de picos e vales oscilantes com medidas aproximadas.

Deve-se também avaliar as curvas de Abbott-Firestone (figura 36) para se obter mais detalhes do perfil topográfico em análise.

Figura 36 - Curvas de Abbott-Firestone da capa interna do rolamento B.



Fonte: Fotografado pelo autor.

As curvas de Abbott-Firestone obtidas da figura indicam que há regiões sulcadas e pontiagudas na topografia e também exibem capacidade de apoio intermediário. No entanto, figura 36(b) evidencia uma curva com maior volume de picos, mais sulcada e com maior volume de material na região de rugosidade média do que a figura 36(a). Dessa forma, a região interior da capa interna do rolamento B apresenta perfil homogêneo com regiões de vales e picos bem distribuídos ao longo da amostra e também possui capacidade de apoio intermediária.

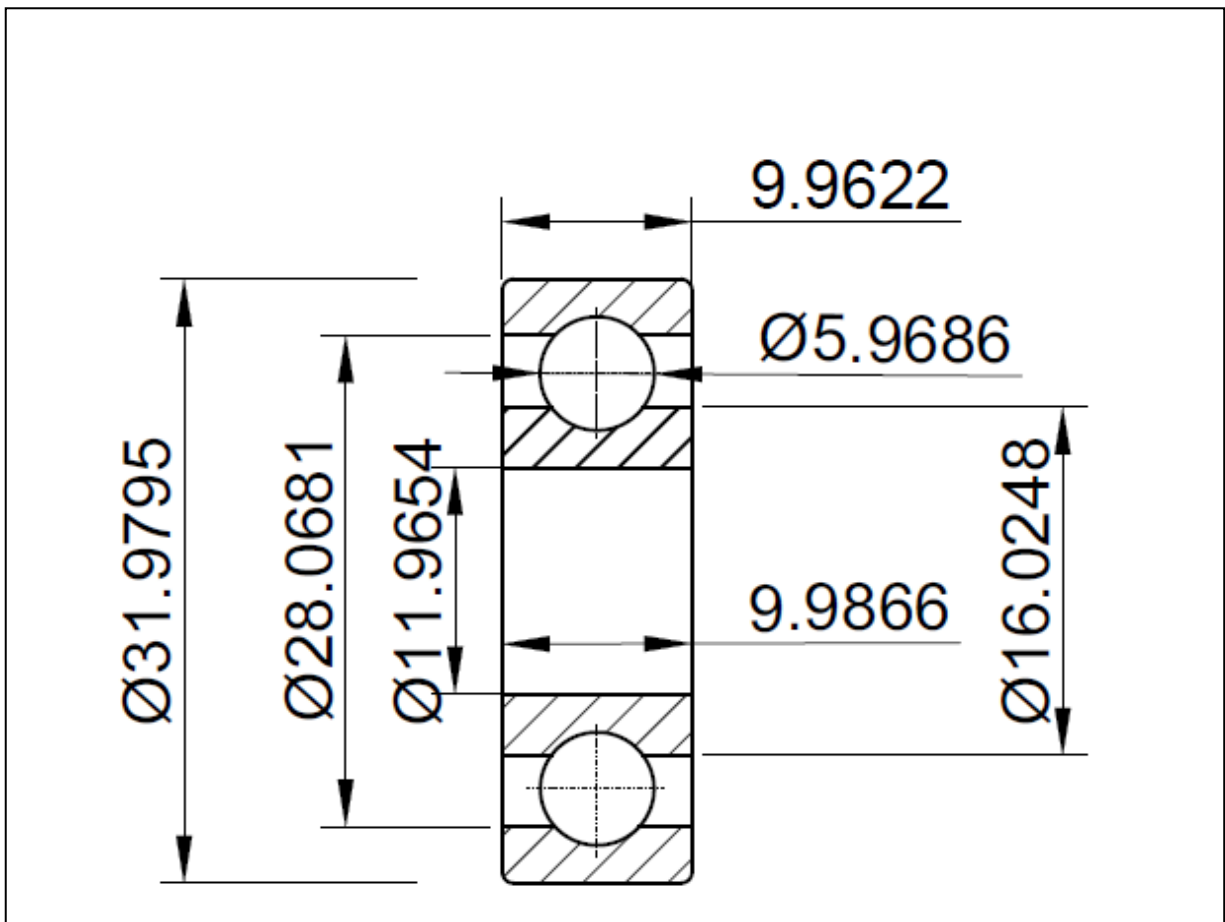
5.2 CONTROLE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO

Os resultados das análises dimensional e geométrica encontram-se nas imagens e tabelas seguintes. Para as dimensões, serão indicados os valores obtidas de largura, diâmetros internos e externos dos anéis internos e externos e os diâmetros das esferas. E referente à geometria, serão abordados valores de ângulo entre plano e cilindro, circularidade e concentricidade.

5.2.1 Dimensões

As dimensões dos rolamentos A e B estão evidenciadas na figura 37 e 38, respectivamente, as quais foram confeccionadas com o auxílio do software AUTOCAD 2018, versão gratuita para estudantes. E a tabela de desvios encontram-se nos anexos A e B deste trabalho.

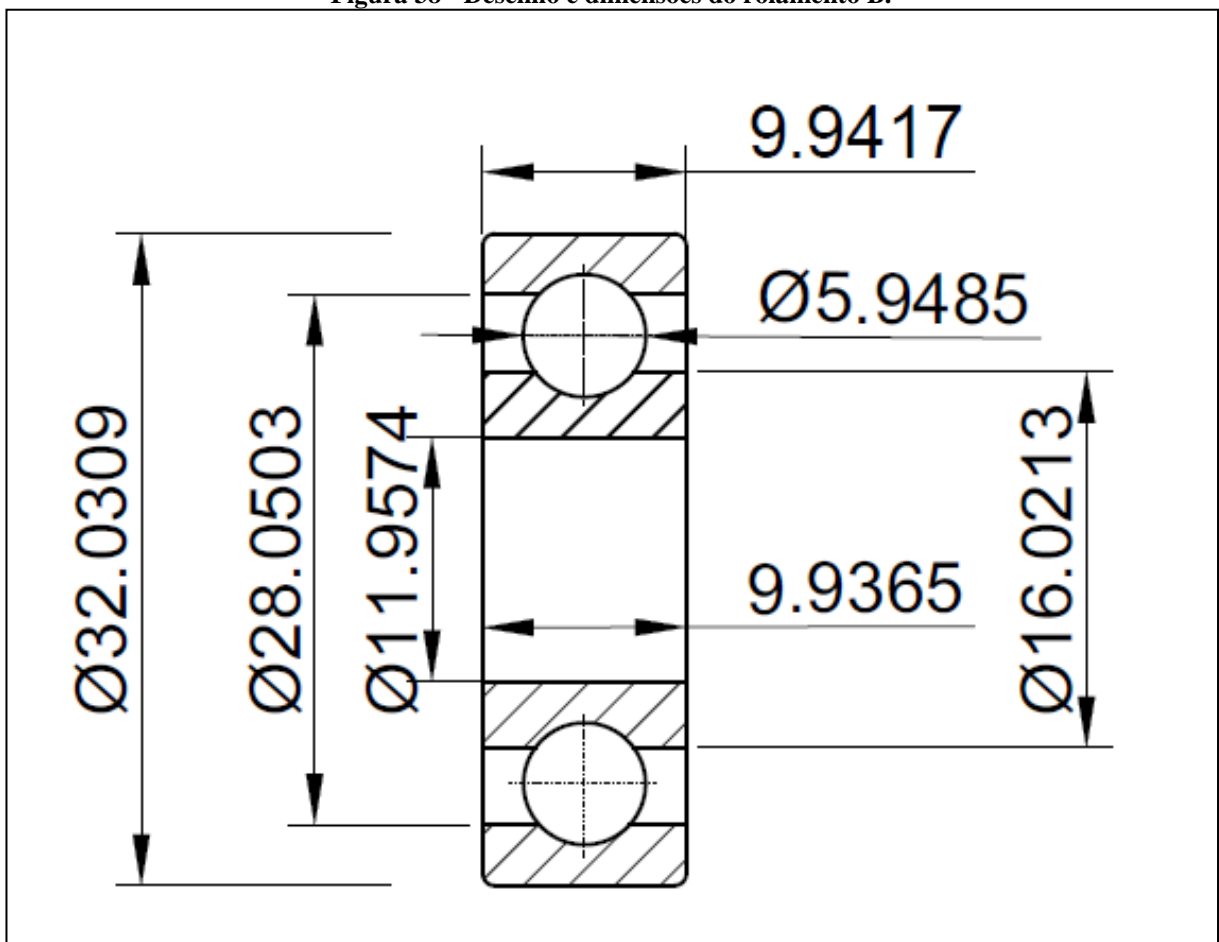
Figura 37 - Desenho e dimensões do rolamento A.



Fonte: Desenhado pelo autor.

Essa figura indica o resultado médio das medições das partes mensuradas. As quais evidenciam que o anel externo possui diâmetro externo de 31,9795mm com desvio padrão de 0,0696mm e o interno de 28,0681mm com desvio padrão de 0,0067mm. Além disso, o anel interno possui diâmetro externo de 16,0248mm com desvio padrão de 0,0010mm e interno de 11,9654mm com desvio padrão de 0,0301mm. E as larguras dos anéis externos e internos são equivalentes a 9,9622mm com desvio padrão de 0,0007mm e 9,9866mm com desvio padrão de 0,0010mm, respectivamente. Assim, as tabelas 2 e 3 confirmam que nenhuma dessas medições estão de acordo com a variação de tolerâncias propostas pela ISO 492. E as esferas apresentaram diâmetro de 5,9686mm com desvio padrão de 0,0063mm.

Figura 38 - Desenho e dimensões do rolamento B.



Fonte: Desenhado pelo autor.

O anel externo do rolamento B apresentou média de diâmetro externo de 32,0309mm com desvio padrão de 0,0024mm e média de diâmetro interno de 28,0503mm com desvio padrão de 0,0268mm. E o anel interno possui média de diâmetro externo de 16,0213mm com desvio padrão de 0,0010mm e média para diâmetro interno de 11,9654mm com desvio padrão

de 0,0301mm. Além disso as médias das larguras dos anéis externos e internos foram respectivamente de 9,9417mm com desvio padrão de 0,0017mm e 9,9364mm com desvio padrão de 0,0039mm. E ao analisar as tabelas 2 e 3, nota-se que esse rolamento também não encontra-se de acordo com as tolerâncias dimensionais propostas pela ISO 492. E os elementos rolantes possuem média de diâmetro com 5,9413mm e desvio padrão de 0,0078mm.

5.2.2 Geometria

As tabelas 4 e 5 evidenciam as médias obtidas para a análise geométrica dos rolamentos A e B, respectivamente.

Tabela 4 - Resultados da análise geométrica do rolamento A.

Rolamento A				
Região	Capa externa		Capa interna	
Característica	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Concentricidade (mm)	0.0539	0.0304	0.0588	0.0312
Circularidade (mm)	0.0654	0.0424	0.0183	0.0019
Ângulo entre plano e cilindro (°)	0.1799	0.0642	0.1071	0.0451

Fonte: Elaborada pelo autor

Os anéis externos e internos do rolamento A apresentaram concentricidade de 0,0539mm com desvio padrão de 0,0304mm e 0,0588mm com desvio padrão de 0,0312mm, respectivamente. O que mostra que o erro de coincidência entre os eixos dos anéis interno e externo são aproximados. Porém, esses desvios são prejudiciais visto que podem elevar as tensões compressivas e elevar o atrito entre as estruturas do rolamento. Além disso, a circularidade do anel externo apresentou resultado de 0,0654mm com desvio padrão de 0,0424mm e do anel interno foi de 0,0183mm e desvio padrão de 0,0019mm. E esses resultados demonstram que o anel externo possui erro de circularidade quatro vezes maior que o erro do anel interno. E isso indica que o anel externo possui maior tendência ao desgaste não uniforme do que a superfície do anel interno. Além disso, os elementos rolantes presentes na pista de rolagem podem possuir maior velocidade de desgaste devido ao elevado erro desse parâmetro. O ângulo entre plano e cilindro para o anel externo foi de 0,1799° com desvio padrão de 0,0642° e o anel interno apresentou ângulo de 0,1071° com desvio padrão de 0,0451°. E esses desvios de ângulo além de poder acarretar o processo de desgaste irregular da região interna do anel interno que estará em contato com um eixo fixo, também pode

propiciar desgaste irregular das esferas entre as pistas de rolagens. Dessa forma, avalia-se que a parte mais afetada pelos efeitos de desvios geométricos será a estrutura do anel interno.

Tabela 5 - Resultados da análise geométrica do rolamento B.

Rolamento B				
Região	Capa externa		Capa interna	
Característica	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Concentricidade (mm)	0.0742	0.0342	0.0329	0.0132
Circularidade (mm)	0.0145	0.0069	0.0164	0.0043
Ângulo entre plano e cilindro (°)	0.0653	0.0339	0.2071	0.0129

Fonte: Elaborada pelo autor

A análise geométrica do rolamento B evidencia que as concentricidades dos anéis externo e interno foram de 0,0742mm com desvio padrão de 0,0342mm e 0,0329mm com desvio padrão de 0,0132mm. E esses valores indicam que houve menor controle na adequação dos centros do anel externo, o qual evidencia erro duas vezes o do anel interno. A circularidade do anel externo apresentou desvio de 0,0145mm com desvio padrão de 0,0069mm e do anel interno o desvio foi de 0,0164mm com desvio padrão de 0,0043mm. O que indica que haverá problemas referentes ao desgaste abrupto dos elementos rolantes esféricos. Além disso, o ângulo entre plano e cilindro do anel externo apresentou resultado de 0,0653° com desvio padrão de 0,0339° e o anel interno apresentou ângulo de 0,2071° com desvio padrão de 0,0129°. Esses valores indicam que o anel interno possui inclinação três vezes maior que a do anel externo. E isso informa que poderá haver acentuação de desgaste nas esferas e pistas de rolamento nos anéis externos e internos. Portanto, percebe-se que para esse rolamento a estrutura que estará mais suscetível aos efeitos de desgaste será o anel interno.

5.3 ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados das análises químicas dos rolamentos A e B encontram-se respectivamente nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Composição química do rolamento A.

Resultados Análise Química A (%)			
Elemento Químico	Anel externo	Anel interno	Esfera
Fe	97.148	97.35	97.792
Cr	1.604	1.618	1.488
Mn	0.41	0.416	0.395
Si	0.175	0.206	0.26
S	0.069	0.056	0.035
Br	0.026	0.034	0.03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Composição química do rolamento B

Resultados Análise Química B (%)			
Elemento Químico	Anel externo	Anel interno	Esfera
Fe	97.749	97.696	97.837
Cr	1.612	1.582	1.565
Mn	0.373	0.417	0.373
Si	0.189	0.246	0.149
S	0.046	0.058	0.041
Br	0.032	-	0.034

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados obtidos indicam que os dois rolamentos são constituídos por aço AISI 52100, de acordo com a tabela 1. E nota-se que esses rolamentos apresentaram composições químicas similares. Ou seja, não há diferença significativa em relação à composição química entre os rolamentos. Porém, não foi averiguado o teor de carbono dessas amostras, o que impossibilita comparar a dureza desses materiais a partir dessas tabelas de composições químicas. Visto que a dureza se relaciona em função proporcional à porcentagem de martensita obtida após tratamento térmico e o teor de carbono do aço.

Além disso, os teores de elementos estabilizadores da austenita e os formadores de carbonetos, como manganês e cromo, respectivamente, poderiam agregar informações referentes à dureza. Pois, Colpaert (2008) explica que o manganês é responsável por estabilizar estruturas cúbicas de face centrada, como a austenita. A qual, caso não esteja estabilizada, pode se transformar em estruturas moles de configuração cúbica de corpo centrado. O autor também discute que o cromo é um elemento que possui afinidade com o carbono e essa interação é responsável por fornecer carbonetos duros estáveis que garantem dureza ao material ferroso. Ou seja, esses elementos garantem resistência ao desgaste em aços para a confecção de rolamentos. Porém, não há diferenças expressivas entre os teores desses

elementos nas estruturas dos rolamentos, o que torna impossível determinar qual seria o produto mais resistente ao desgaste apenas pela análise química.

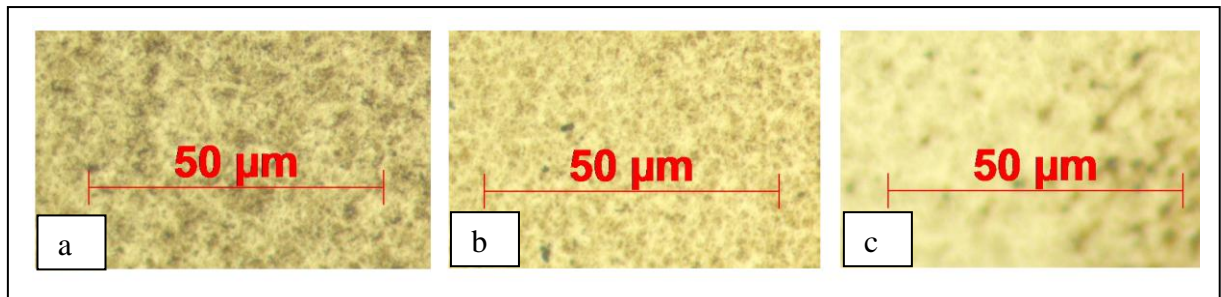
Portanto, é necessário avaliar a microestrutura e a microdureza Vickers para averiguar as peculiaridades entre esses rolamentos referentes à resistência ao desgaste.

5.4 METALOGRAFIA

5.4.1 Microscopia óptica

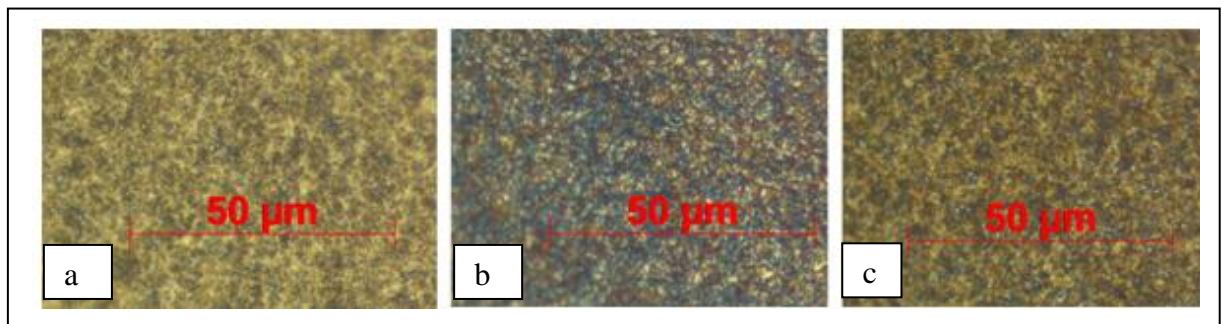
As imagens obtidas por análise metalográfica estão ilustradas nas figuras 39 e 40.

Figura 39 - Micrografia do a)anel externo, b)esfera e c)anel interno do rolamento A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Micrografia do a)anel externo, b)esfera e c)anel interno do rolamento B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As imagens obtidas não propiciaram uma averiguação adequada a respeito das microestruturas presentes nas amostras. Isso devido a impossibilidade de aproximação e ausência de resolução oferecida pelo equipamento. Por isso, a observação sobre os teores de carbono das amostras, os tamanhos de grãos e o tipo de microestrutura foram impossibilitadas. O que inviabiliza a discussão mais afunda sobre os tratamentos térmicos evidenciados por esses rolamentos.

No entanto, de acordo com Colpaert (2008), os aços para construção mecânica do tipo AISI 52100, possuem microestrutura formada por austenita retida e martensita revenida em placas ou ripas. O autor alega que quando o fator mais importante de projetos mecânicos é a resistência ao desgaste, o que seria ideal aos rolamentos, visa-se atingir estrutura com 100% de martensita com a maior dureza possível para minimizar os efeitos de desgaste. Ele também afirma que a microestrutura mais viável em resistência mecânica e tenacidade nesses aços é a martensita revenida. O que confronta a utilização de rolamentos com estruturas esferoiditas propostas por Bhadeshia (2011), visto que essas possuem dureza inferior à martensita revenida e, por consequência, não ofereceriam resistência ao desgaste adequada aos rolamentos.

E devido à ausência de resolução, não foi possível identificar a presença dessas estruturas. No entanto, de acordo com a bibliografia, nessas figuras a porção amarelada evidencia a matriz de austenita retida, as regiões brancas os carbonetos pró-eutetóides e as regiões mais escuras demonstram as estruturas martensíticas revenidas.

A figura 39 evidencia as partes do rolamento A, o qual evidenciou porção evidente de austenita retida e carbonetos pró-eutetóides devido a prevalência da coloração amarelada e esbranquiçada nestas figuras. E destaca-se que para esse rolamento foi possível avaliar o tamanho do grão. Os quais revelam-se menores na figura 39(b), na esfera. E de acordo com Colpaert (2008), quanto menor o tamanho de grão austenítico, maior a área de contorno disponível, o que minimiza os efeitos de segregação de elementos, e isso pode ser benéfico ao passo que reduz efeitos fragilizantes. Entretanto, grãos menores facilitam o processo de nucleação de constituintes em contornos de grão. E essa característica pode ser prejudicial em relação à resistência ao desgaste.

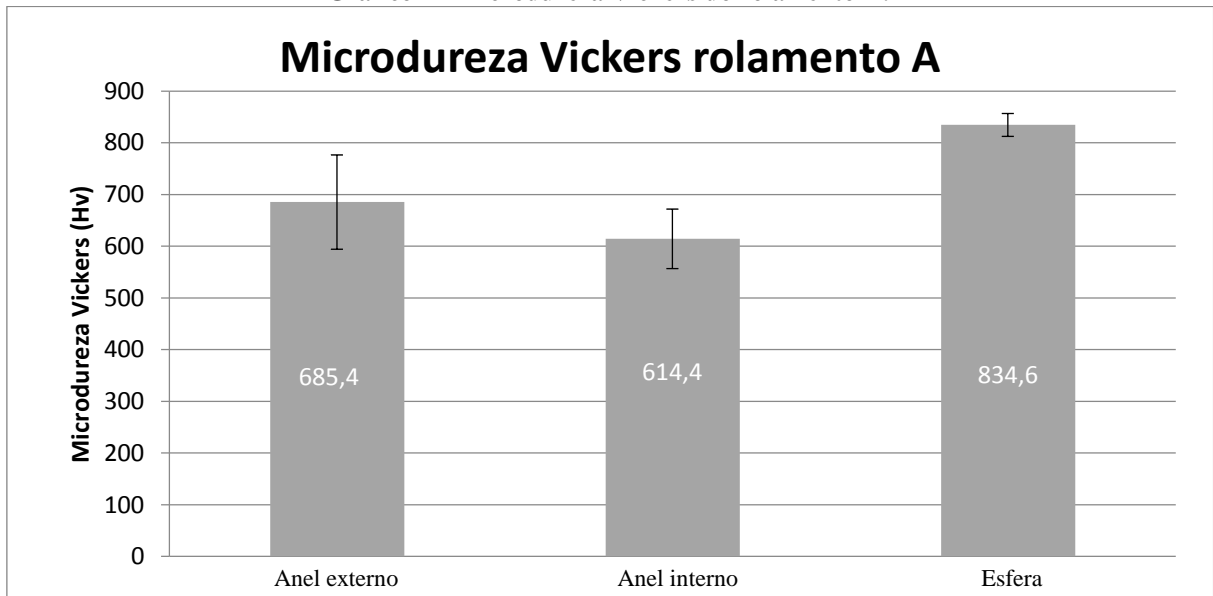
Além disso, caso o tratamento térmico for ministrado com aquecimento e resfriamento adequados é possível obter dureza elevada. E Galindo-Nava e Rivera-Díaz-del-Castillo (2016) corroboram essa análise ao registrarem que durante o revenimento pode ocorrer o processo de endurecimento por precipitação de carbonetos e conversão de fase austenítica retida em martensita, o que pode propiciar dureza de até 1100Hv.

A figura 40 ilustra as partes do rolamento B, que além de evidenciar regiões amareladas, também mostrou a prevalência de regiões mais escuras. E observa-se que a figura 40(b), a esfera, apresentou comportamento diferente ao das outras micrografias por apresentar menor porção de região de austenita retida e prevalência de regiões mais escuras. Dessa forma, julga-se importante investigar a microdureza dessas regiões para se obter mais informações sobre os microconstituintes e a resistência ao desgaste dessas amostras.

5.4.2 Microdureza Vickers

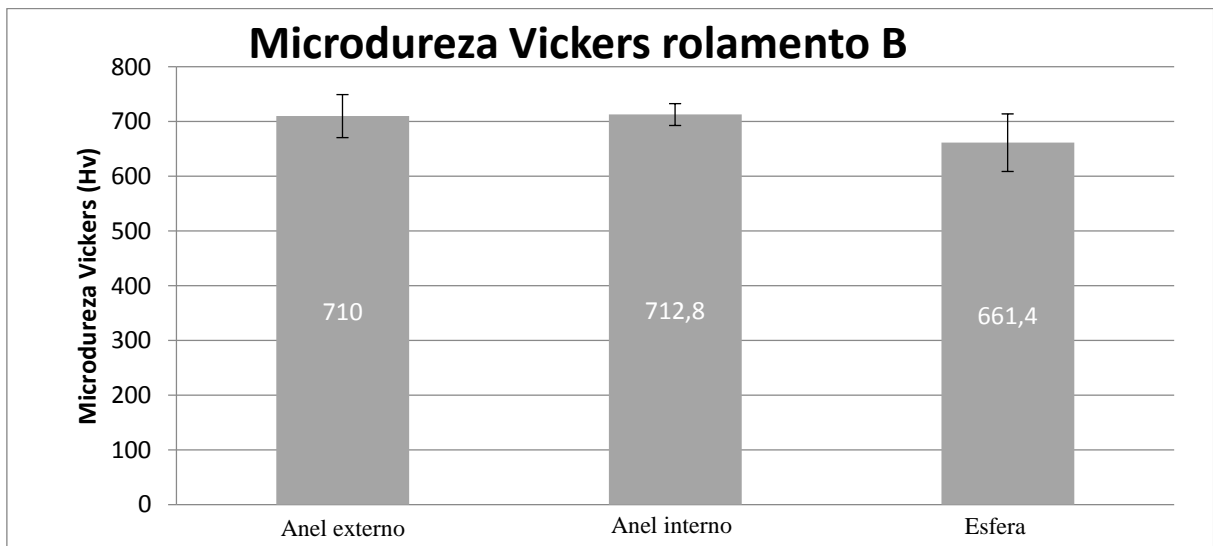
Os gráficos 7 e 8 ilustram os resultados das médias de microdureza Vickers obtidas e os desvios padrões para as estruturas dos rolamentos A e B, respectivamente.

Gráfico 7 - Microdureza Vickers do rolamento A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 8 - Microdureza Vickers do rolamento B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 7 mostra que o anel externo do rolamento A apresentou microdureza Vickers média de 685,4Hv com desvio padrão de 91,1Hv. O anel interno com média de microdureza Vickers de 614,4Hv e desvio padrão de 57,6Hv. E a microdureza Vickers média

da esfera foi de 834,6Hv com desvio padrão de 22,1Hv. O gráfico 8 mostra microdureza Vickers média de 710Hv para o anel externo do rolamento B e desvio padrão de 39,3Hv. O anel interno de 712,8Hv com desvio padrão de 20Hv. E a esfera exibiu microdureza Vickers média de 661,4Hv com desvio padrão de 52,6Hv. Assim, esses resultados estão de acordo com a faixa de dureza de aços revenidos exibida pela figura 3. O que comprova a presença do constituinte martensita revenida nas micrografias. Além disso, pode-se afirmar que a temperatura de revenimento nesses rolamentos foram inferiores a 400°C.

Os resultados de microdureza Vickers do o rolamento A foram similares para a capa interna e capa externa. Entretanto, a esfera desse rolamento apresentou microdureza Vickers média 17% maior que a média do anel externo. E para o rolamento B, os resultados de dureza foram mais homogêneos. Em que o anel externo e o anel interno apresentaram microdureza Vickers média similar. Porém, a esfera apresentou microdureza Vickers 7% menor que a média do anel interno.

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA

Os próximos quadros irão comparar os resultados obtidos neste trabalho com o intuito de prever o desempenho e possíveis falhas dos rolamentos durante execução de movimento rolante. O quadro 2 irá comparar as rugosidades dos anéis internos, externos e as esferas dos rolamentos A e B. O quadro 3 irá conferir os resultados da análise dimensional e geométrica. E o quadro 4 proverá informações referentes à comparação da análise metalográfica dos rolamentos.

Quadro 2 - Análise comparativa de rugosidade

Parâmetro	Rolamento					
	A			B		
	Pista de rolagem	Anel interno	Anel externo	Pista de rolagem	Anel interno	Anel externo
Ra (µm)	0,141 ± 0,04	0,285 ± 0,009	0,245 ± 0,11	0,185 ± 0,07	0,338 ± 0,043	0,121 ± 0,01
Rq (µm)	0,167 ± 0,04	0,36 ± 0,015	0,303 ± 0,12	0,202 ± 0,067	0,421 ± 0,058	0,151 ± 0,01
Rt (µm)	1,017 ± 0,183	2,207 ± 0,203	3,143 ± 1,73	0,82 ± 0,316	2,803 ± 0,657	1,04 ± 0,07
Rz (µm)	0,452 ± 0,08	1,837 ± 0,161	1,107 ± 0,33	0,393 ± 0,061	2,025 ± 0,296	0,698 ± 0,04
Homogeneidade	Não homogênea	Não homogênea	Não homogênea	Não homogênea	Homogênea	Homogênea
Controle de acabamento	Presença	Presença	Ausência	Ausência	Presença	Presença

Resistência ao desgaste	Alta	Baixa	Intermediária	Intermediária	Baixa	Baixa
Capacidade de apoio	Alta	Baixa	Intermediária	Intermediária	Baixa	Baixa

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Rugosidade média:** O desgaste e corrosão por contato acontece quando duas superfícies, sobre efeitos de forças compressivas, submetem-se a movimento relativo oscilatório. O qual pode acelerar o processo de desgaste por atrito ou propiciar falha por fadiga. E no que tange à rugosidade, Singh, Melkote e Hashimoto (2005) avaliaram que quanto mais rugosa uma superfície, maior será os efeitos de fricção causados por essa. E a análise de rugosidade média dos rolamentos indicam que o rolamento A apresentou rugosidade média inferior para a pista de rolagem e do anel interno, se comparado rolamento B. O que indica que o rolamento A poderá apresentar maior resistência ao desgaste. Além disso, o anel externo do rolamento A apresentou maior rugosidade média que o anel externo do rolamento B.

No entanto, Pereira, Yue e Wahab (2017) confrontam os efeitos da rugosidade sobre o desgaste e a resposta de fricção ao concluírem que os maiores efeitos de desgaste por atrito estão relacionados pelo número de ciclos executados, e não pela rugosidade. Pois os efeitos de desgaste acarretados pela rugosidade são evidenciados apenas nos primeiros três mil ciclos. Além disso, os autores avaliaram que ao aumentar a rugosidade, aumenta-se o comprimento das ranhuras causadas pelo desgaste, mas não influencia na profundidade do desgaste. Dessa forma, considera-se inconclusivo relacionar os efeitos da rugosidade média sobre o desgaste por atrito devido às divergências de resultados encontrados sobre o problema.

- **Capacidade de retenção de lubrificante:** Essa característica fica restrita à pista de rolagem, visto que é nessa superfície que se deposita o material lubrificante para amenizar os efeitos de atrito. E ao comparar as pistas dos dois rolamentos, nota-se que o rolamento A apresenta vales mais profundos do que o rolamento B. O que viabiliza maior retenção de lubrificantes e que, conseqüentemente, garante maior potencial de lubrificação no rolamento A e garante melhor resistência ao desgaste por atrito.

- Controle de acabamento: A pista de rolagem e o interior do anel interno são as estruturas que devem possuir melhor controle durante confecção de rolamentos. Isso porque elas ficam sujeitas aos maiores efeitos de desgaste. E de acordo com Yuan et al (2008), deve-se controlar o acabamento para garantir morfologia adequada a fim de minimizar os efeitos de fricção, desgaste e maximizar a lubrificação. Na pista de rolagem, por exemplo, almeja-se estrutura não homogêneas com vales profundos ao longo do perfil de rugosidade para melhorar retenção de lubrificante. E foi notado consistência dessa morfologia na superfície do rolamento A. Entretanto, não pode-se julgar a resistência ao desgaste apenas pelo controle de acabamento. A exemplo do anel interno do rolamento A, o qual apresentou controle de acabamento, porém apresentou pouca quantidade de material na região de rugosidade média. Sendo assim, é essencial melhorar o controle de acabamento para maximizar a funcionalidade do rolamento. E concluiu-se que o rolamento A apresenta melhor controle de processo do que o rolamento B, o que justifica um dos motivos da superioridade e elevado preço do rolamento A.
- Resistência ao desgaste: A resistência ao desgaste foi determinada a partir da avaliação da quantidade de área de rugosidade central presente nas curvas de Abbot-firestone. As quais apresentaram maiores valores para o rolamento A. E destaca-se os resultados apresentados pela pista de rolagem desse rolamento, que apresentou elevada quantidade de material contido na região de rugosidade central. Entretanto, a pista de rolagem do rolamento B apresentou menor área de rugosidade central. O que indica que esse rolamento resiste menos ao desgaste do que o rolamento A.
- Capacidade de apoio: Esse critério avalia e permite fazer inferências sobre área real de contato entre as superfícies. Sendo que quanto menor a capacidade de apoio, maior será os efeitos de desgaste sobre uma superfície. E nota-se no quadro 2 que o rolamento A apresentou melhor capacidade de apoio do que o rolamento B.

Quadro 3 - Análise comparativa das dimensões e geometria

Parâmetro	Rolamento					
	A			B		
	Anel externo	Anel interno	Esfera	Anel externo	Anel interno	Esfera
Diâmetro externo (mm)	31,9795 ± 0,0696	16,0248 ± 0,001	5,9686 ± 0,006	32,0309 ± 0,0028	16,0213 ± 0,0011	5,9485 ± 0,0078
Diâmetro interno (mm)	28,0681 ± 0,0067	11,9654 ± 0,0301	-	28,0503 ± 0,0268	11,9574 ± 0,0075	-
Largura (mm)	9,9622 ± 0,0007	9,9866 ± 0,001	-	9,9417 ± 0,0017	9,9365 ± 0,0039	-
ISO 492	Não	Não	-	Não	Não	-
Concentricidade (mm)	0,0539 ± 0,0304	0,0588 ± 0,0312	-	0,0742 ± 0,0342	0,0329 ± 0,0132	-
Circularidade (mm)	0,0654 ± 0,0424	0,0183 ± 0,0019	-	0,0145 ± 0,0069	0,0164 ± 0,0043	-
Ângulo entre plano e cilindro (°)	0,1799 ± 0,0642	0,1071 ± 0,0451	-	0,0653 ± 0,0340	0,2071 ± 0,0129	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

O quadro 3 justifica o porquê desses rolamentos serem considerados de segunda classe no mercado. Isso devido ao fato de não estarem inseridos em limites de tolerâncias dimensionais, além de apresentarem desvios elevados se comparados aos mínimos e máximos propostos por normas. Além disso, os fabricantes não disponibilizam informações sobre os limites de tolerâncias geométricas. O que indica que não há controle de qualidade adequado e que não há expectativa de vida útil longa aos rolamentos analisados. A seguir serão discutidos alguns parâmetros presentes no quadro 3.

- Diâmetros: A análise dos diâmetros evidencia que os rolamentos não estão de acordo com as normas que regulamentam os limites de tolerâncias. Além disso, observa-se que o rolamento B evidenciou maior folga entre os anéis externo e interno e essa característica pode acarretar na maior frequência de impactos entre as esferas e essas estruturas. E de acordo com Li et al (2018), as pistas de rolagem podem ser locais viáveis de manifestação de defeitos como trincas, lascados e corrosão por pites. E quando ocorre excesso de choques das esferas nos anéis, impulsos periódicos vibracionais são emitidos. O que pode levar o rolamento à falha. Esse fenômeno prova que o rolamento B possui maior chances de falhar do que o rolamento A.

- **Largura:** As larguras também não cumprem os limites de tolerâncias dimensionais. E o rolamento B apresentou maior folga de largura. O que pode acarretar na maior frequência de colisões entre as esferas e os anéis internos e externos.
- **Concentricidade:** O controle de concentricidade é realizado em produtos que requerem balanço de partes precisos, espessuras iguais e funções que necessitam de distribuição de massa equilibrada (Krulikowski, 1998 p. 284). E para rolamentos, é essencial realizar o controle de concentricidade, visto que quanto maior o erro, maior será os problemas relacionados às rotações, por exemplo o excesso de batimentos, que elevam o desgaste. Porém, a análise de coincidência dos diâmetros das partes dos rolamentos aponta que os dois rolamentos não evidenciaram avaliação adequada de concentricidade. Isso devido a ausência de norma regulamentadora que determina limite de tolerância. Assim, assume-se que o ideal seria o erro nulo. No entanto, o rolamento A apresentou erros similares para os anéis interno e externo. Enquanto o rolamento B evidenciou maior erro para o anel externo e menor erro para o anel interno. Dessa forma, os dois rolamentos estão sujeitos a sofrerem desgaste acelerado devido à elevada frequência de batimentos entre os anéis com as esferas.
- **Circularidade:** Krulikowski (1998) afirma que erros de circularidade acarretam na falha prematura de rolamentos. E dentre esses rolamentos, os erros de circularidade foram maiores para o anel externo e interno do rolamento A. O que indica que esse rolamento poderá falhar com antecedência devido ao aceleração do processo de desgaste por causa do excesso de pressão compressiva exercida sobre os elementos rolantes. Porém, a análise de circularidade também se mostra acentuada para as partes do rolamento B. O que indica que esse também não se veda aos efeitos de desgaste anômalo. Isso, porque os dois rolamentos não se situam nos limites de tolerâncias dimensionais propostos por normas regulamentadoras. Entretanto, não há normas ou limitações que especifiquem as tolerâncias de circularidade a fim de garantir qualidade ao produto. Pois, caso o rolamento possua os diâmetros de acordo com os limites de tolerâncias dimensionais, espera-se que o erro de circularidade desses sejam mínimos. Assim, supõe-se que a característica desejável seria o desvio nulo para se evitar falhas inesperadas.

- Ângulo entre plano e cilindro: Tanto o anel externo quanto o anel interno desses rolamentos apresentaram desvios significativos que comprometem a execução adequada do movimento rolante. E percebe-se que o anel externo do rolamento A apresentou maior erro se comparado ao anel interno. Enquanto no rolamento B o anel interno apresentou maior erro. Assim, espera-se que as esferas e os anéis desses rolamentos tendam a manifestar desgaste acelerado devido aos erros de inclinação.

Quadro 4 - Análise comparativa metalográfica

Parâmetro	Rolamento					
	A			B		
	Anel externo	Anel interno	Esfera	Anel externo	Anel interno	Esfera
Microestrutura	Martensita revenida					
Microdureza Vickers (Hv)	685,4 ± 91,1	614,4 ± 57,6	834,6 ± 22,1	710 ± 39,3	712,8 ± 20	661,4 ± 52,6

Fonte: Elaborado pelo autor

- Microdureza Vickers: Por um lado, tem-se o rolamento A que apresentou elevado valor de dureza nas esferas. O que é benéfico, pois durante a execução de movimento rolante do conjunto as esferas serão menos susceptíveis aos efeitos de desgaste causados pelo contato entre elas com os anéis interno e externo, o que garante funcionalidade adequada ao rolamento. Por outro, há o rolamento B com elementos rolantes com dureza menor que os anéis interno e externo. Ou seja, durante o desempenho desse elemento de máquina, as esferas poderão ser mais desgastadas devido à menor dureza que as outras estruturas, o que poderá comprometer a funcionalidade do rolamento. Pois esse fenômeno acarretaria na manifestação de movimento deslizante do rolamento, o que elevaria o atrito e, conseqüentemente, a aceleração do desgaste. Sendo assim, espera-se que o rolamento A seja menos suscetível à falha do que o rolamento B. Porém, Cui, San-Martín e Rivera-Díaz-del-Castillo (2017) informam que a obtenção de dureza acima de 653Hv é essencial para proteger os componentes de rolamentos de falha por fadiga. E ao analisar a dureza do anel interno do rolamento A, percebe-se que essa encontra-se menor do que o limite proposto. O que indica que esse rolamento também está apto em sofrer falhas acarretadas pela dureza não adequada.

6 CONCLUSÃO

A caracterização das propriedades tribológicas e mecânicas dos rolamentos 6201 indicaram que esses rolamentos possuem deficiências de rugosidade, dimensionais, geométricas e microestruturais. Entretanto, avaliou-se que o rolamento A possui melhores características tribo-mecânicas para resistir ao desgaste e às falhas por fadiga.

- A análise dos parâmetros de amplitude: R_a , R_q , R_t e R_z desses rolamentos determinaram que o rolamento A apresentou estruturas menos rugosas e com melhor controle de acabamento. E no que se refere aos parâmetros estatísticos: R_{vk} , R_k e R_{pk} , conclui-se que o rolamento A além de apresentar melhor resistência ao desgaste, também evidenciou maior capacidade de apoio do que o rolamento B.
- A avaliação das dimensões e da regularidade geométrica desses rolamentos indica que ambos não se encontram de acordo com normas técnicas por não estarem adequados aos limites de tolerâncias.
- Os resultados de microdureza Vickers sugerem que o rolamento A seja menos suscetível ao desgaste por apresentar maior dureza dos componentes rolantes. Entretanto, o anel interno desse rolamento possui dureza insegura para efeitos de fadiga, o que indica que essa estrutura está comprometida a sofrer falha catastrófica.
- As análises das microestruturas por ensaio metalográfico não apresentaram resolução compatível para a visualização dos constituintes. Entretanto, a análise de resultados de microdureza Vickers possibilitaram aferir que esses rolamentos são constituídos por fase martensítica revenida, austenita retida e carbonetos precipitados.

7 SUGESTÕES AOS TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a microestrutura formada entre as marcas de rolamento e a relação com a resistência ao desgaste.
- Realizar embutimento em baquelites mais duras para que não ocorra formação de planos durante processo de lixamento.
- Realizar análise de desgaste nos componentes do rolamento.
- Estudar as características dos lubrificantes presentes nas pistas de rolagem dos rolamentos.
- Estudar os efeitos de rugosidade média sobre o desgaste em rolamentos.
- Analisar a relação custo e benefício entre os rolamentos relacionando vida útil.
- Avaliar resistência à corrosão das partes dos rolamentos.
- Analisar a influência das folgas na vida útil dos rolamentos.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZANI, A. G. Jr.; DE SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Manole, 2008. 407 p.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The science and engineering of Materials**. 6.ed. Stamford: CENGAGE Learning, 2010. 949 p.

BARDAL, E. **Corrosion and protection**. Trondheim: Springer, 2003. 328 p.

BINDER, M.; KLOCKE, F.; DOEBBELER, B. **Abrasive wear behaviour under metal cutting conditions**. Wear. Aachen: Elsevier, 2017, p.376-377.

BHADESHIA, H. K. D. H. **Steels for bearings**. University of Cambridge. Cambridge, 2011. 267 p.

BHADESHIA, H. K. D. H. **Steels for bearings**. Progress in Materials Science: Elsevier, 2012. v.57. pp. 268-435.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2002. 736 p.

BHUSHAN B. **Introduction to tribology**. 2.ed. Columbus: John Wiley & Sons Ltd, 2013. 711 p.

BOOSER E. R. **Tribology data handbook**. New York: CRC Press, 1997. 1090 p.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach**. 3.ed. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 911 p.

Caracterização de estruturas de superfícies. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4101471/mod_resource/content/1/Rugosidade%20-%20Pr%C3%A1tica%209.pdf>. Acesso em: 26 de março de 2019.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4.ed. Revista e atualizada por André Luiz V. Da Coista e Silva. Villares Metals: Editora Blucher, 2008. 652 p.

CUI, W.; SAN-MARTÍN, D.; RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTILLO, P. E. J. **Towards efficient macrostructural design and hardness prediction of bearing steels - an integrated experimental and numerical study**. Materials & Design: Elsevier, 2017. v.133, pp. 464-475.

DAVIM, J. P. **Tribology for engineers: a practical guide**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. 287 p.

DEAN, R.R.; EVANS, C.J. **Plain bearing materials: the role of tin**. Tribology International: Elsevier, 1976. pp. 101-108.

Deep groove ball bearings FAG generation. Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 15 p.

DONG, W. P.; SULIVAN, P. J.; STOUT, K. J. **Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional topography**. *Wear*, 1994. v.178, pp. 29-43.

DONG, J.; VETTERS H.; HOFFMANN, F.; ZOCH H. W. **Microstructure and fatigue strength of the bearing steel 52100 after shortened bainitic treatment**. *Bearing Steel Technologies: ASTM International*, 2010. v.8, pp. 17-31.

GADELMAWLA, E. S.. KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. **Roughness parameters**. *Journal of materials processing technology: Elsevier*, 2002. pp. 133-145.

GALINDO-NAVA, E., I.; RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTILLO, P., E., J. **Understanding the factors controlling the hardness in martensitic steels**. *Scripta Materialia: Elsevier*, 2016, pp. 96-100.

GEBRETSADIK, D. W.; HARDELL, J.; PRAKASH, B. **Tribological performance of tin-based overlay plated engine bearing materials**. *Tribology International: Elsevier*, 2015, pp. 281-289.

GOHAR, R.; RAHNEJAT, H. **Fundamentals of tribology**. 2 ed. *Imperial College Press*, 2012. 426 p.

GOHAR, R.; RAHNEJAT, H. **Fundamentals of tribology**. *World Scientific*, 2017. 487 p.

GUPTA, P.; PRADHAN, M. K. **Fault detection analysis in rolling element bearing: a review**. *Materials Today: Proceedings 4: Elsevier*, 2017. pp. 2085-2094.

GUYER JR., R. A. **Rolling bearing handbook and troubleshooting guide**. *Chilton Book Company*, 1996. 254 p.

HARNOY, A. **Beating design in machinery: engineering tribology and lubrication**. *Ney York: Marcel Dekker*, 2003. 640 p.

HALLING, J. **Principles of tribology**. *London: The Macmillan Press Ltd*, 1978. 401 p.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Friction and wear of engineering materials**. 2.ed. *Cambridge: Elsevier*, 2017. 377 p.

ISO 492. **Rolling bearings - radial bearings - tolerances**. 4.ed. *International Standard*, 2002. 25 p.

ISO 10360. **Geometric product specifications (GPS) - acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)**. 11 p.

ISO 1101. **Geometrical product specifications (GPS) - geometrical tolerancing - tolerances of form, orientation, location and run-out**. 4.ed. *International Standard*, 2017. 144 p.

ISO 1101. **Technical drawings - geometric tolerancing - tolerancing of form, orientation, location and run-out, generalities, definitions, symbols, indications on drawings.** 2.ed. International Standard, 2004. 54 p.

JONES, T. L. **Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment.** Maryland:Carderock Division, 2011. 522 p.

KUMAR, R.; AZAM, M. S.; GHOSH, S. K. **Influence of stochastic roughness on performance of a rayleigh step bearing operating under thermo-elastohydrodynamic lubrication considering shear flow factor.** Tribology International: Elsevier, 2019. v. 134. pp. 264-280.

KRULIKOWSKI, A. **Fundamentals of geometric dimensioning and tolerancing.** 2.ed. Delmar, 1998. 383 p.

LI, X.; YU, K.; MA, H.; CAO, L.; LUO, Z.; LI, H.; CHE, L. **Analysis of varying contact angles and load distributions in defective angular contact ball bearing.** Engineering Failure Analysis: Elsevier, 2018. v.91. pp. 449-464.

MAJSTOROVIC, V.; JAKOVLJEVIC, Z. **Proceedings of 5th International conference on advanced manufacturing engineering and technologies.** Newtech 2017: Springer, 2017. 469 p.

NEALE, M.J. **Lubrication and Reliability Handbook.** Woburn: Butterworth Heinemann, 2001.

NETO, J. C. S. **Metrologia e controle dimensional.** Elsevier, 2012. 242 p.

PANDA, S.; PANDA, S.N.; NANDA, P.; MISHRA, D. **Comparative study on optimum design of rolling element bearing.** Tribology International: Elsevier, 2015. pp. 595-604.

PARK, J. S.; LEE, S. M.; JOO, B. S.; JANG H. **The effect of material properties on the stick -slip behaviour of polymers: a case study with PMMA, PC, PTFE and PVC.** Wear. Seoul: Elsevier, 2017. pp. 378-379.

PEREIRA, K.; YUE, T.; WAHAB, M. A. **Multiscale analysis of the effect of roughness on fretting wear.** Tribology International: Elsevier, 2017. v.110. pp. 222-231.

PETROUPOLOS, P. G. N.; PANDAZARAS, N. P.; DAVIM, J. P. **Surface texture characterization and evaluation related to machining.** 1.ed. Surface Integrity in Machining: Springer, 2010. pp. 37-66.

Precision measuring instruments, 2016. Disponível em: <http://pdf.directindustry.es/pdf-en/tesa/tesa-general-catalogue/24600-811135-_4.html> Acesso em: 16 abr. 2019.

QIU, M.; CHEN, L.; LI, Y.; YAN, J. **Bearing tribology: principles and applications.** Beijing: National Defense Industry Press, 2017. 333 p.

RAHNEJAT, H. **Tribology and dynamics of engine and powertrain: fundamentals, applications and future trends.** Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. 1018 p.

SINGH, R.; MELKOTE, S. N.; HASHIMOTO, F. **Frictional response of precision finished surfaces in pure sliding**. *Wear*: Elsevier, 2005. v.258. pp. 1500-1509.

SÓRIA, B. S. **Estudo do comportamento das vibrações em fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 utilizando transformada de wavelet**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SOUSA, A. R. **A medição por coordenadas na garantia da qualidade da produção do 3º milênio**. Congresso Brasileiro de Metrologia, 2003.

SPINNERMINT. **Guides: bearing basics: parts of a bearing explained**. 2017. Disponível em: <https://spinnermint.com/guides/75/bearing-basics-parts-of-a-bearing-explained/>. Acesso em: 26 de maio de 2019.

TAKADOUM, J. **Materials and surface engineering in tribology**. London: ISTE Ltd, 2008. 223 p.

THOMAS, T. R. **Rough surfaces**. London: Imperial College Press, 1982. 261 p.

VIITALA, R.; GRUBER, G.; HEMMING, B.; WIDMAIER, T.; TAMMI, K.; KUOSMANEN, P. **Device and method for measuring thickness variation of large roller element bearing rings**. *Precision Engineering*: Elsevier, 2019. v.55. pp. 59-69.

WANG, Y.; WANG, W.; ZHANG, S.; ZHAO, Z. **Effects of raceway surface roughness in an angular contact ball bearing**. *Mechanism and Machine Theory*: Elsevier, 2018. v.121. pp. 198-212.

WILLIAMS, J. **Engineering tribology**. Cambridge University Press, 2005. 457p.

Anexo A - Quadros de desvios para medições dimensionais e geométricas do rolamento A

Quadro 5- Medições da capa externa do rolamento A

Rolamento A - Capa externa					
Parâmetro	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Largura	9.9614	9.9625	9.9627	9.9622	0.0007
Θ interno	1.9582	1.947	1.959	1.954733	0.006709198
Diametro externo	31.9939	32.0375	31.9012	31.97753	0.069608357
α entre plano e cilindro	0.1641	0.2505	0.1251	0.1799	0.064175696
Circularidade	0.0171	0.0828	0.0964	0.065433	0.042406643
Concentricidade	0.0566	0.0828	0.0222	0.053867	0.030392324
Diametro interno = Diametro externo - 2 Θ interno	28.068064				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 6 - Medições da capa interna do rolamento A

Rolamento A - Capa interna					
Parâmetro	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Largura	9.9857	9.9877	9.9864	9.9866	0.001014889
Θ interno	12	11.9454	11.9509	11.96543	0.030061659
Diametro externo	16.024	16.0245	16.026	16.02483	0.001040833
α entre plano e cilindro	0.0746	0.0882	0.1586	0.107133	0.045087175
Circularidade	0.0175	0.0204	0.0169	0.018267	0.001871719
Concentricidade	0.0383	0.0947	0.0433	0.058767	0.031219438

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 7- Medições das esferas do rolamento A

Rolamento A - Esfera					
Parâmetro	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Diâmetro da esfera	5.9699	5.9741	5.9617	5.968567	0.00630661

Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo B - Quadros de desvios para medições dimensionais e geométricas do rolamento A

Quadro 8- Medições da capa externa do rolamento B.

Rolamento B - Capa externa					
Parâmetro	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Largura	9.9409	9.9437	9.9405	9.9417	0.00174356
Θ interno	1.9806	2.0206	1.9697	1.9903	0.02680056
Diametro externo	32.0286	32.0341	32.0301	32.03093	0.00284312
α entre plano e cilindro	0.0998	0.0319	0.0643	0.065333	0.033961792
Circularidade	0.0095	0.0116	0.0224	0.0145	0.006921705
Concentricidade	0.0952	0.0347	0.0927	0.0742	0.034230834
Diametro interno = Diametro externo - 2 Θ interno	28.05033				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 9- Medições da capa interna do rolamento B.

Rolamento B - Capa interna					
Parâmetro	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Largura	9.9337	9.9409	9.9348	9.936467	0.003878574
Θ interno	11.9653	11.9566	11.9503	11.9574	0.007531932
Diametro externo	16.02	16.022	16.022	16.02133	0.001154701
α entre plano e cilindro	0.2168	0.212	0.1924	0.207067	0.012926459
Circularidade	0.0114	0.0189	0.0188	0.016367	0.00430155
Concentricidade	0.0466	0.0318	0.0202	0.032867	0.013232284

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 10- Medições das esferas do rolamento B.

Rolamento B - Esfera					
Parâmetro	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Diâmetro da esfera	5.9413	5.9568	5.9475	5.948533	0.007801496

Fonte: Elaborado pelo autor.