

PROJETO DE GRADUAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL DO AÇO ASTM A352 CA6NM

por

Vitória Carolina Silva Duarte

Brasília, 29 de Novembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL DO AÇO
ASTM A352 CA6NM**

por

Vitória Carolina Silva Duarte

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

Banca Examinadora

Prof. Dr. Thiago Doca, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Dr. Éder Lima de Albuquerque, UnB/ ENM

Dr. Michel Sullivan Teixeira Pires, UnB/ ENM

Brasília, 29 de Novembro de 2018

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e forças para superar cada dificuldade.

Toda gratidão pela minha família, principalmente minha mãe Lucimara e a minha vó Geralda por terem cuidado tanto de mim, pelo apoio emocional e por nunca desistirem de mim. Às minhas queridas irmãs Letícia, Natália e Deborah Carolina por serem meu porto seguro nesta caminhada.

Abraço às minhas amigas da Engenharia Química Anna Carolline, Jéssica e Vivian por sempre estarem comigo, por cada conversa, por sempre me apoiarem e brigarem comigo. Em especial aos meus amigos Sarah Albuquerque, Isadora Bugarin e Lucas Macedo por serem meus companheiros na Engenharia Mecânica em cada matéria que achávamos impossível, mas conseguimos.

Aos meus eternos amigos do PET-Química da UnB, em especial a minha querida amiga e professora Elaine.

Aos amigos do grupo de carona solidária que tornaram as idas e vindas da UnB mais prazerosas.

Aos amigos do Centro Espirita Maria Madalena que comemoraram cada vitória obtida nesta jornada acadêmica e que sempre estão em prece por mim.

Aos amigos do estágio do CODIG - TJDFT pela compreensão das minhas ausências e pela força que sempre me deram. Vocês são demais!!

Ao meu colega Matheus Xavier por lixar muitas amostras comigo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica a minha mais sincera admiração e respeito por cada conteúdo lecionado.

E o que dizer do meu orientador Thiago? Obrigada, primeiramente, pela oportunidade e, acima de tudo, pela paciência comigo e por todos os ensinamentos.

A todos que participaram e influenciaram de alguma forma a minha trajetória acadêmica.

Vitória Duarte

RESUMO

A liga ASTM A352 CA6NM, comercialmente conhecida como UNS J91540, é uma combinação de ferro, carbono (0,06%), cromo (11,0 ~ 14,0%), níquel (3,50 ~ 4,0%) e molibdênio (0,40 ~ 1,00%) classificada como aço inoxidável martensítico. Por possuir boa resistência a certos tipos de agentes corrosivos, como água do mar, é muito utilizada nas indústrias química, naval e em refinarias. A corrosão de componentes essenciais na atividade dessas indústrias (peças de turbinas hidráulicas, hélices, impulsores de bombas de sucção) pode acarretar desde perdas financeiras a acidentes envolvendo pessoas. Por isso se torna necessário o estudo de materiais a fim de melhorar a vida útil desses componentes. O objetivo deste trabalho é a obtenção das seguintes propriedades superficiais: dureza, rugosidade e distância de indentação. Foi observada uma dureza de 100 HR30T. A rugosidade superficial foi reduzida após o ensaio de compressão e as distâncias de indentação experimentais, mensuradas em microscópio confocal, tiveram um boa concordância com os valores analíticos.

ABSTRACT

The alloy ASTM a352 CA6NM, commercially known as UNS J91540, is a combination of iron, carbon (0,06%), chromium (11,0 ~ 14,0%), nickel (3,50 ~ 4,0%) e molybdenum (0,40 ~ 1,00%) being classified as martensitic stainless steel. Since it has high resistance against corrosives, like seawater, it's highly used on chemical, naval, and oil industries. The corrosion of essential compounds of those industries (parts of water turbine, propellers, suction pump impeller) may cause financial losses or even accident, because of these reasons it's necessary to study this alloy in order to improve the lifespan of those equipment. Therefore, this report consists in the characterization of hardness, roughness and indentation depth. A hardness of 100 HR30T was observed. The surface roughness has been decreased after the compression tests and the indentation depth, measured with a confocal microscope, is in good agreement with the analytical data.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 ESTRUTURA TEXTUAL	2
2 REVISÃO TEÓRICA.....	3
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.....	3
2.2 AÇO INOXÍDAVEL ASTM A352 CA6NM	3
2.3 TEORIAS DE DUREZA	5
2.3.1 DUREZA BRINELL	6
2.3.2 DUREZA ROCKWELL.....	8
2.3.3 DUREZA VICKERS.....	11
2.4 TEORIA CLÁSSICA DE MECÂNICA DO CONTATO	13
2.4.1 CONTATO HERTZIANO ENTRE ESFERAS.....	13
2.4.2 TESTE DE COMPRESSÃO	15
2.5 RUGOSIDADE	16
2.5.1 DESVIO MÉDIO DE RUGOSIDADE (R_a).....	18
2.5.2 DESVIO MÉDIO QUADRÁTICO (R_q).....	19
2.5.3 COEFICIENTE DE SIMETRIA DE RUGOSIDADE (R_{sk}).....	20
2.5.4 ALTURA MÉDIA MÁXIMA DO PERFIL (R_z).....	21
3 MÉTODOS	22
3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS.....	22
3.2 ENSAIOS DE DUREZA	23
3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO	24
3.4 ENSAIOS DE RUGOSIDADE	27
4 RESULTADOS	29
4.1 TESTE DE MICRODUREZA VICKERS	29
4.2 TESTE DE DUREZA SUPERFICIAL ROCKWELL.....	31
4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO	34
4.4 TESTE DE RUGOSIDADE	41
5 CONCLUSÕES	44
5.1 PERSPECTIVAS.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
APÊNDICE.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Letra que indica a porcentagem de níquel e cromo na liga inoxidável. (Fonte: <i>ASTM</i>).....	4
Figura 2.2 - Esquemático do ensaio de dureza Brinell.	6
Figura 2.3 - Teste de dureza Rockwell. (Fonte: <i>Materials Science And Testing</i> , Da ATT).....	8
Figura 2.4 - Esquemático do teste de dureza Vickers. (Fonte: CIMM).....	12
Figura 2.5 - Contato entre o indentador e o corpo de prova.	13
Figura 2.6 - Perfil de pressão no contato entre duas esferas.....	14
Figura 2.7 - Esquemático do teste de compressão.....	16
Figura 2.8 - Imagem de uma superfície, seguida da forma, ondulações e por fim rugosidade.	17
Figura 2.9 - Comprimentos para avaliação de rugosidade. (Fonte: Gravalos et al, 2010).	18
Figura 2.10 - Parâmetro de desvio médio de rugosidade (R_a). (Fonte: <i>Olympus Scientific Solutions Americas</i>)	18
Figura 2.11 - Parâmetro de desvio médio quadrático (R_q). (Fonte: <i>Olympus Scientific Solutions Americas</i>)	19
Figura 2.12 - Coeficiente de simetria de rugosidade (R_{sk}). (Fonte: <i>Olympus Scientific Solutions Americas</i>)	20
Figura 2.13 - Parâmetro de altura média máxima do perfil (R_z). (Fonte: <i>Olympus Ixet</i>).....	21
Figura 4.1 - Amostra no processo de lixamento na Politriz.	22
Figura 4.2 – Microdurômetro <i>DuraScan</i> , da EMCOTESTE.....	23
Figura 4.3 - durômetro universal, da Zwick/Roell.	24
Figura 4.4 – Sapata e a pastilha de material ASTM a352 CA6NM	25
Figura 4.5 - Pastilha com as áreas de ensaio indicado.	25
Figura 4.6 - Montagem para ensaio de compressão.	26
Figura 4.7 - Microscópio confocal Lext 3D measuring laser	27
Figura 4.8 - Amostra de a352 CA6NM em formato de pastilha	27
Figura 4.9 - Análise de rugosidade em relação ao eixo x, y e na borda.	28
Figura 6.1 - Amostra de ASTM A352 CA6NM.....	29
Figura 6.2 - Impressão do teste de microdureza Vickers na amostra 0.	30
Figura 6.3 - Área de ensaio (branca) de dureza superficial.....	32
Figura 6.4- Ensaio 1 de carga de 500 N por deslocamento em mm.	35
Figura 6.5 - Ensaio 2 de carga de 1000 N por deslocamento em mm.	35
Figura 6.6 - Ensaio 3 de carga de 2000 N por deslocamento em mm.	36
Figura 6.7 - Perfil representativo das medições de profundidade nos eixos x e y - carga de 1000 N. ...	38
Figura 6.8 - Gráfico da profundidade, em μm , pela carga aplicada (N).....	39
Figura 6.9 - Carga por área da calota.	40
Figura 6.10 - Região da amostra analisada no microscópio com aumento de 5x.....	41
Figura 6.11 - Ensaio de rugosidade após o ensaio de compressão com as linhas identificadas.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química do aço ASTM A352 CA6NM.....	4
Tabela 2.2 - Propriedades físico e materiais ASTM A352 CA6NM.....	5
Tabela 2.3 - Escala de dureza de Mohs.....	5
Tabela 2.4 - Condições para teste de dureza Brinell.....	7
Tabela 2.5 - Escala Rockwell e as suas variantes, conforme o tipo de indentador, pré-carga, carga e aplicações.....	9
Tabela 2.6 - Parâmetro R_a o comprimento efetivo (l_e).....	19
Tabela 4.1 - Resultados de microdureza Vickers da amostra 1 com a carga de 2 kgf.....	30
Tabela 4.2 - Resultados de microdureza Vickers da amostra 1 com a carga de 0,2 kgf.....	30
Tabela 4.3 - Carga aplicada no ensaio em função do diâmetro da esfera do indentador.....	31
Tabela 4.4 - Resultados de dureza Brinell da amostra 1 com carga de 15,625 kgf com um indentador de 2,5 mm de diâmetro de tungstênio.....	31
Tabela 4.5 - Dureza HR30T e profundidade (h) de cada amostra, com médias de dureza e profundidade.....	32
Tabela 4.6 - Dureza superficial HR30T para cada amostra.....	32
Tabela 4.7 - Dureza Rockwell B (HRB) transformada da HR30T.....	33
Tabela 4.8 - Dureza Rockwell B (HRB) para materiais.....	33
Tabela 4.9 - Raio da área de contato, pressão máxima e o deslocamento analítico para cada amostra.....	34
Tabela 4.10 - Raio da área de contato, pressão máxima e o deslocamento experimental para cada amostra.....	36
Tabela 4.11 - Comparação entre o raio da área de contato teórica e experimental.....	37
Tabela 4.12 - Profundidade experimental para cada amostra, respectivamente, em relação ao eixo x e y e a média.....	38
Tabela 4.13 - Área da calota e os comprimentos em x e y e média para cada amostra.....	39
Tabela 4.14 - Resultados preliminares dos parâmetros de rugosidade para amostra 1.....	41
Tabela 4.15 - Parâmetros de rugosidade após o ensaio de compressão para amostra 1 de 500 N.....	42
Tabela 4.16 - Parâmetros de rugosidade após o ensaio de compressão para amostra 2 de 1000 N.....	42
Tabela 4.17 - Parâmetros de rugosidade após o ensaio de compressão para amostra 3 de 2000 N.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

a	Raio da área de contato	[mm]
a_{cal}	Área da calota	[mm ²]
A_p	Área de pico em relação a linha média	[mm ²]
A_v	Área de vale em relação a linha média	[mm ²]
d	Deslocamento dos centros das duas esferas em contato	[mm]
D	Diâmetro da impressão	[mm]
D_e	Diâmetro do indentador	[mm]
E^*	Módulo de elasticidade de contato	[GPa]
E_1	Módulo de elasticidade da esfera 1	[GPa]
E_2	Módulo de elasticidade da esfera 2	[GPa]
F	Carga aplicada no ensaio de dureza	[kgf]
F_0	Pré-carga de teste	[kgf]
F_C	Força aplicada no ensaio de compressão	[N]
h	Profundidade da marca plástica	[μm]
HB	Dureza Brinell	[kN/mm ²]
HR	Dureza Rockwell	
HRB	Dureza Rockwell na escala B	
HV	Dureza Vickers	[kN/mm ²]
l_e	Comprimento efetivo (<i>cutoff</i>)	[mm]
l_m	Comprimento medido	[mm]
l_t	Comprimento total da amostra	[mm]
P	Pressão de contato das duas esferas	[MPa]
$P_{máx}$	Tensão de contato de Hertz	[MPa]
R_1	Raio da esfera 1 ou raio da sapada	[mm]
R_2	Raio da esfera 2	[mm]
R_a	Desvio médio de rugosidade	[μm]
R_{eq}	Raio de curvatura equivalente	[mm]
R_p	Altura máxima dos picos	[μm]
R_q	Desvio médio quadrático de rugosidade	[μm]
R_{SK}	Coefficiente de simetria da rugosidade	
R_v	Profundidade máxima dos vales	[μm]
R_z	Altura média máxima	[μm]
s	Deslocamento da esfera 1 ou sapata	[mm]

Z Altura do pico ou vale em relação a linha média [mm]

Símbolos gregos

σ	Tensão média	[Mpa]
σ_x	Tensão principal na direção x	[MPa]
σ_y	Tensão principal na direção y	[MPa]
σ_z	Tensão principal na direção z	[MPa]
ν	Coeficiente de Poisson	

Siglas

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ACI</i>	Alloy Casting Institute
<i>AISC</i>	American Institute of Steel Construction
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>BSSA</i>	British Stainless Steel Association
<i>CIMM</i>	Centro de Informação Metal Mecânica
<i>SI</i>	Sistema Internacional de Medidas

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização, motivação e objetivos deste trabalho, abordando o estudo das propriedades superficiais do aço em estudo.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo Seetharaman (2005) a metalurgia refere-se à ciência e tecnologia dos metais. É a combinação da química, física e mecânica com ênfase aos metais. O principal propósito na produção de metais e ligas é ter materiais com propriedades aperfeiçoadas, a aplicação desses materiais está condicionada a fatores técnicos e econômicos.

Notadamente, nas últimas décadas do século XX, o conhecimento acumulado sobre as relações entre composição química, estrutura, propriedades e desempenho sobre essas características atingiu um nível que vem permitindo o incessante desenvolvimento de novas ligas e o aprimoramento das ligas existentes, para que estes pudessem ser utilizados da melhor forma possível, desde utensílios simples até os complexos componentes de usinas termoeletricas. (Santos, 2013).

Desde o ano 2000, a Petrobrás vem construindo usinas termoeletricas e ampliando seu potencial que, hoje, já ultrapassam a capacidade de 6.000 MW de energia (Petrobrás, 2018). Nestas usinas, a energia é produzida por um gerador, que impulsiona a energia resultante da queima de combustível que, ao queimar, aquece a caldeira contendo água. A pressão muito alta acompanhada nesta produção de vapor, o que faz com que as pás das turbinas se movam, o que, por sua vez, aciona o gerador de energia e o ciclo de produção continua.

Os aços inoxidáveis, devido à sua propriedade de resistência à corrosão pela água, são utilizados na fabricação de componentes industriais. Esta classe de aços surgiu da importância de melhorar a baixa soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos, tanto para a fabricação, quanto para os reparos de rotores de turbinas hidráulicas e, também, para aumentar a resistência à cavitação durante a operação destes equipamentos, mediante a redução do teor de carbono e adição adequada de níquel (Henke, 1998).

Em especial, o aço ASTM A352 CA6NM, usado na confecção do eixo de transmissão de potência, é o CA6N, modificado com molibdênio, para melhorar a resistência à corrosão e a maleabilidade de fundição (AISC, 2004). Imagine-se o prejuízo financeiro que uma trinca no eixo de transmissão de uma turbina acarretará, além da turbina parar e atrasar o sistema. Portanto, o conhecimento das propriedades superficiais é de suma importância a fim de determinar melhores aplicações do material.

Ao contrário do senso comum este aço possui poucas propriedades materiais conhecidas e as conhecidas são incomuns, então ele vem sendo estudada pelo Grupo de Fadiga, Fratura de Materiais, da Universidade de Brasília, e é de interesse do grupo, para suas pesquisas e aplicações, conhecer as

propriedades superficiais deste tipo de aço e, a literatura técnico-científica sobre este assunto não parece ser muito ampla.

1.2 MOTIVAÇÃO

Chiaverini (1981) diz que os agentes de destruição de aço, como corrosão e desgaste, são preocupantes na hora de projetar. O desconhecimento ou a simples desconsideração das implicações destes atributos fundamentais podem acarretar problemas inesperados e, em alguns casos, irreparáveis.

Um material pode se desgastar por diversos mecanismos e entender esse processo é muito importante para concepção correta no projeto e destacando a eleição do material que suporte este desgaste. As características tribológicas, isto é, o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste, não são propriedades reais do material, mas dependem no sistema em que esses materiais devem funcionar, como descrito Friederich (2002).

1.3 OBJETIVOS

Esse trabalho apresenta um estudo das características superficiais da liga ASTM A352 CA6NM. São objetivos específicos deste estudo:

- Realizar uma análise topográfica da face lixada e polida;
- Mensurar parâmetros de rugosidade (desvio médio da rugosidade - R_a , desvio médio quadrático da rugosidade - R_q , coeficiente de simetria - R_{sk} e altura média máxima - R_z);
- Identificar a dureza superficial (Vickers e Rockwell 30T);
- Realizar ensaios de compressão monotônica para estudo da mecânica do contato entre as superfícies.

1.4 ESTRUTURA TEXTUAL

Este relatório se divide em capítulo 1, introdução, que contém a contextualização, motivação e os objetivos principais e a estrutura do texto através da qual o trabalho será apresentado. No capítulo 2 está apresentada a revisão teórica, em que são detalhados conhecimentos teóricos sobre a liga de interesse, as teorias sobre dureza, compressão e os parâmetros pertinentes de rugosidade. No capítulo 3 encontram-se os métodos de preparo das amostras e os ensaios; o capítulo 4 contém os resultados dos ensaios efetuados; o capítulo 5 traz as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros e, por fim, no encontram-se listadas as referências bibliográficas.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo faz uma revisão dos aspectos conhecidos do aço ASTM A352 CA6NM e quais serão analisadas no trabalho, como dureza superficial, tensão de contato e rugosidade.

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Surgiram na primeira metade do século XX, constituindo grupos de aços de alta liga baseado em combinações de Ferro-Cromo, Ferro-Cromo-Carbono e Ferro-Cromo-Níquel. Para ter essa denominação, o aço deve conter, no mínimo, 10,5% de cromo. Segundo a *British Stainless Steel Association* (2018) esta condição permite a formação, na superfície do material, de uma camada de óxido que possui uma boa resistência à corrosão. Esta característica é atribuída à presença de cromo e quanto maior o seu teor mais resistente. Estes aços também possuem resistência à oxidação a altas temperaturas. Facilidade de conformação e resistência mecânica elevada são algumas outras propriedades encontradas em algumas classes desses aços (Lippold e Kotecki, 2005).

O aço inoxidável também contém quantidades variáveis de carbono, silício e manganês. Outros elementos, como o níquel e o molibdênio, podem ser adicionados para conferir outras propriedades úteis, como maior capacidade de formação e maior resistência à corrosão.

Com essas informações, infere-se que são classificados conforme a microestrutura dominante ao final de sua produção. Neste contexto, as três classes mais comuns seriam as dos aços austeníticos, ferríticos e martensíticos.

2.2 AÇO INOXIDÁVEL ASTM A352 CA6NM

Os aços inoxidáveis martensíticos são fundamentalmente ligas de Ferro-Cromo-Carbono que contêm entre 12 e 18% de cromo e entre 0,1 e 0,5% de carbono e que podem ser austenitizadas se forem aquecidas a uma temperatura adequada. Apresentam elevada temperabilidade e são facilmente endurecíveis por tratamento térmico. Sua resistência à corrosão tende a ser inferior a dos outros tipos (austeníticos e ferríticos), que é alto comparado a outros materiais. São adequados para aplicações que requerem elevadas resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão ou erosão em ambiente seco ou úmido (Modenesi, 2001).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) que normatiza e regulariza normas técnicas para produtos e serviços, classifica o material objeto de estudo deste trabalho como A352 grau CA6NM, que é classificada pelo *Alloy Casting Institute* (ACI) segundo a utilização e composição química.

Devido à sua alta temperabilidade (é a capacidade de endurecimento ou possui obter estrutura martensítica, Reed-Hill, 1982), este material é utilizado em diversas aplicações que abrangem geração

de energia, petróleo *offshore* e campos petroquímicos, sendo comumente utilizados na fabricação de peças grandes como rotores de turbinas hidráulicas, bombas e partes de compressores.

A primeira letra da denominação do aço CA6NM refere-se a sua resistência em meios corrosivos (C). A segunda letra indica nominalmente os teores de cromo e níquel (A). Com o aumento do teor de níquel, a designação pode ser alterada de A a Z, como pode ser observado na Figura 2.1. Os números que seguem as duas primeiras letras indicam o teor máximo de carbono em porcentagem vezes 100. Por último, as letras subsequentes, correspondem à primeira letra dos elementos de liga presentes no material, neste caso, níquel (N) e molibdênio (M).

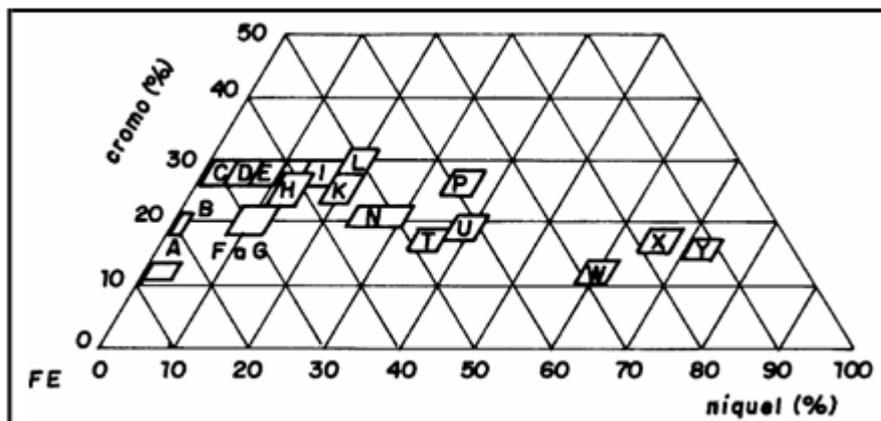


Figura 2.1 - Letra que indica a porcentagem de níquel e cromo na liga inoxidável. (Fonte: ASTM)

A Tabela 2.1 expõe as faixas permissíveis de composição química para o aço A352 de acordo com a *Alloy Casting Industries* (2018).

Tabela 2.1 - Composição química do aço ASTM A352 CA6NM.

Elemento	Composição (%)
Carbono (C)	Máximo de 0,06
Manganês (Mn)	Máximo de 1,00
Silício (Sc)	Máximo de 1,00
Fósforo (P)	Máximo de 0,040
Enxofre (S)	Máximo de 0,030
Níquel (Ni)	3,50 - 4,50
Cromo (Cr)	11,50 - 14,00
Molibdênio (Mb)	0,40 - 1,00
Cobre (Cu)	Máximo de 0,50
Vanádio (V)	Máximo de 0,05
Tungstênio (W)	Máximo de 0,05
Elementos residuais	Máximo de 0,50

Em seguida, a Tabela 2.2 apresenta propriedades físicas e do material conhecidas deste material, conforme *Material Properties Database* (MakeItFrom.com).

Tabela 2.2 - Propriedades físico e materiais ASTM A352 CA6NM.

Propriedades	
Dureza	HB 250
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Alongamento na ruptura	17%
Deformação com 0,02% de tensão	40%
Resistência a fadiga	380 MPa
Coefficiente de Poisson	0,28
Resistência a tração	850 MPa
Tensão de escoamento	620 MPa

2.3 TEORIAS DE DUREZA

A dureza é a resistência à penetração ao material. Essa característica está relacionada à deformação plástica do material causada por uma pressão significativa tornando-se, assim, uma grandeza mensurável (Baptista, 2002). É o teste mais importante e mais utilizado para caracterização e avaliação das propriedades de materiais, principalmente dos metais.

De forma sucinta é a dureza do material a deformação permanente gerada por indentador. Com essa marca de impressão é possível estabelecer uma relação da área com a pré-carga e se obter um valor de dureza, como será explicado.

Inicialmente, o teste de dureza consistia em arranhar o material com outro e, assim, obter uma escala comparativa. Havia uma barra de arranhar com grau de dureza gradativo, de uma extremidade para outra. Esta barra era graduada para 10 tipos de minerais, bastante prática, podendo aferir, pela escala de dureza, tanto no laboratório, quanto em campo. Foi criada pelo mineralogista austríaco Frederick Mohs (1824), tornando possível a determinação da dureza relativa de um mineral. É, no entanto, necessário determinar quais materiais a barra pode riscar e quais outros não o pode. A escala de dureza está explicitada pela Tabela 2.3 (Klein, 1989).

Tabela 2.3 - Escala de dureza de Mohs.

Mineral	HM
Talco	1
Gesso	2
Calcita	3
Fluorita	4
Apatita	5
Ortoclásio	6
Quartzo	7
Topaz	8
Corindo	9
Diamante	10

Ao fazer essa aferição se observará o seguinte: algumas vezes, quando um mineral é mais mole do que outro, porções do primeiro deixarão marca sobre o segundo (mais duro), que poderá ser tomada, erroneamente, como um risco. Esta marca, todavia, poderá ser removida esfregando-se um dos dedos sobre a superfície do mineral. É importante comentar que a dureza não é absoluta, pois alguns materiais podem alterar a sua dureza devido às condições em que se encontram podendo, portanto, ser modificada. É sempre aconselhável, quando se faz um ensaio de dureza, inverter a ordem do processo, isto é, não tentar riscar somente o mineral A com B, mas, também, B com A.

São três, as escalas de dureza por penetração: Brinell, Rockwell, Vickers e mais duas de microdureza, Vicker e Knoop.

2.3.1 DUREZA BRINELL

Criado por J. A. Brinell (1920), esse método consiste em indentar o material com uma esfera de aço endurecido, ou metal duro com 10 mm de diâmetro, com uma carga de 3000 kgf. A norma ABNT NM187 (05/1999) Materiais metálicos - Dureza Brinell determina os procedimentos e parâmetros para realização do teste.

Para materiais mais moles, a carga pode ser reduzida para 1500 kgf ou 500 kgf para que não haja uma deformação excessiva e para que a marca não seja maior, pois ambos ocasionariam um erro na leitura. A equação 2.1 mostra a relação entre a dureza Brinell com a carga (F) e o diâmetro da esfera do indentador (D_e).

$$HB = 0.102 \frac{F}{D_e^2} \quad (2.1)$$

A carga nominal é normalmente aplicada conforme o tipo de material e, seguindo orientação do fabricante da máquina, para ferros fundidos o tempo de aplicação pode variar de 10 a 15 segundos, enquanto que, para outros materiais o tempo pode chegar até 30 segundos. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** é o esquemático para o ensaio de dureza Brinell.

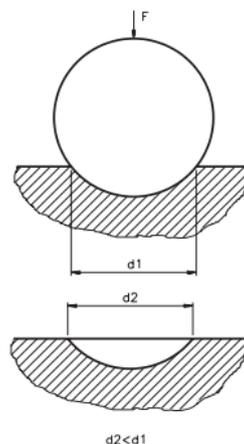


Figura 2.2 - Esquemático do ensaio de dureza Brinell.

Após o ensaio, a dureza de Brinell pode ser matematicamente definida conforme a calota impressa no material, que pode ser definida pela equação 2.2.

$$HB = \frac{F}{\frac{\pi}{2} D(D - \sqrt{D^2 - D_e^2})} \quad (2.2)$$

em que: F é a carga aplicada no teste; D_e é o diâmetro do indentador; D é o diâmetro de impressão, sendo esta última, D, a média entre duas leituras tomadas em ângulo reto.

O uso de uma Tabela de Número de Dureza Brinell (HB) pode simplificar a determinação da dureza. Um número Brinell revela as condições de teste e tem um formato como "75 HB 10/500/30", significando que o valor 75 foi obtido para a dureza, usando uma esfera de aço de 10 mm de diâmetro, com uma carga de 500 kgf, aplicados durante 30 segundos. A Tabela 2.4 refere-se às condições do teste, retirada da Norma *ASTM E10-01 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, com adaptações.

Tabela 2.4 - Condições para teste de dureza Brinell.

Condições do teste	Diâmetro da esfera (mm)	Dureza Brinell	Carga kN (kgf)
HB 10/3000	10	30	29.42 (3000)
HB 10/1500	10	15	14.71 (1500)
HB 10/1000	10	10	9.807 (1000)
HB 10/500	10	5	4.903 (500)
HB 10/250	10	2.5	2.452 (250)
HB 10/125	10	1.25	1.226 (125)
HB 10/100	10	1	0.981 (100)
HB 5/750	5	30	7.355 (750)
HB 5/250	5	10	2.452 (250)
HB 5/125	5	5	1.226 (125)
HB 5/62.5	5	2.5	0.613 (62.5)
HB 5/31.25	5	1.25	0.306 (31.25)
HB 5/25	5	1	0.245 (25)
HB 2.5/187.5	2.5	30	1.839 (187.5)
HB 2.5/62.5	2.5	10	0.613 (62.5)
HB 2.5/31.25	2.5	5	0.306 (31.25)
HB 2.5/15.625	2.5	2.5	0.153 (15.625)
HB 2.5/7.8125	2.5	1.25	0.077 (7.8125)
HB 2.5/6.25	2.5	1	0.063 (6.25)
HB 2/120	2	30	1.177 (120)
HB 2/40	2	10	0.392 (40)
HB 2/20	2	5	0.196 (20)
HB 2/10	2	2.5	0.098 (10)
HB 2/5	2	1.25	0.049 (5)
HB 2/4	2	1	0.039 (4)
HB 1/30	1	30	0.294 (30)
HB 1/10	1	10	0.098 (10)
HB 1/5	1	5	0.049 (5)
HB 1/2.5	1	2.5	0.024 (2.5)
HB 1/1.25	1	1.25	0.012 (1.25)
HB 1/1	1	1	0.0098 (1)

Levi (2003) diz que este teste é, na maioria das vezes, aplicado em peças de ferro fundido e de aço, pois é uma dureza de superfície média. Com isto a dureza medida no teste abrange uma porção maior de material, resultando numa média de medição mais precisa, tendo em conta possíveis estruturas policristalinas e heterogeneidades do material.

2.3.2 DUREZA ROCKWELL

Proposto pela Indústria Rockwell, nos Estados Unidos, em 1922. No Brasil, o teste, que leva o nome da indústria segue a norma ABNT NBR NM146-1- Materiais metálicos - Dureza Rockwell - Parte 1: Medição da dureza Rockwell (escalas A, B, C, D, E, F, G, H e K) e Rockwell superficial (escalas 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T e 45 T).

O preparo e o teste, que consiste em indentar o material sob teste com um cone de diamante, com o ângulo entre as faces de 120° , ou indentador de esfera de aço endurecido de tungstênio. Este é pressionado contra a superfície do corpo de prova com uma pré-carga (F_0), usualmente de 10 kgf. Quando o equilíbrio é atingido, um dispositivo indicativo, que segue os movimentos do indentador e responde às variações da profundidade de penetração, é ajustado para a posição zero, conforme a Figura 2.3.

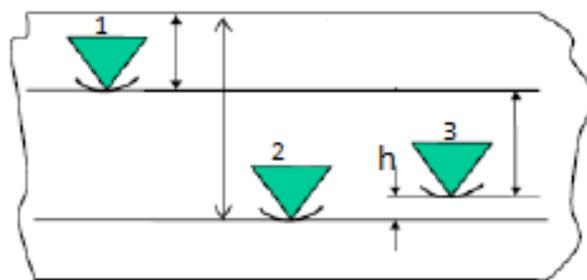


Figura 2.3 - Teste de dureza Rockwell. (Fonte: *Materials Science And Testing*, Da ATT)

Ainda com a pré-carga aplicada, uma segunda carga é introduzida, aumentando a penetração. Atingido novamente o equilíbrio, a carga é removida, mantendo-se a pré-carga. A remoção da carga provoca uma recuperação parcial, reduzindo a profundidade da penetração. O aumento permanente na profundidade da penetração resultante da aplicação e remoção da carga é usado para calcular o valor da dureza Rockwell (Low, 2001).

A ASTM E18-94- *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials* define 30 tipos de escalas de dureza Rockwell, sendo dividida em duas categorias: escala de dureza Rockwell regular e escala de dureza superficial Rockwell, que se diferenciam pela pré-carga que é aplicada. Na primeira, esta é de 10 kgf, enquanto que, na segunda, de apenas 3 kgf. A Tabela 2.5 mostra todos os tipos citados na norma.

Tabela 2.5 - Escala Rockwell e as suas variantes, conforme o tipo de indentador, pré-carga, carga e aplicações.

Escala Rockwell	Tipo da escala	Tipo de indentador	Pré-carga N (kgf)	Carga N (kgf)	Materiais
	A	Cone de diamante	98.07 (10)	588.4 (60)	Carbonetos cimentados, aços finos, aço duro temperado.
	B	Esfera de aço endurecido – 1.588 mm (1/16 in)	98.07 (10)	980.7 (100)	Ligas de cobre, aços macios, ligas de alumínio e ferros maleáveis e etc.
	C	Cone de diamante	98.07 (10)	1471 (150)	Aços, ferros fundidos, aço maleáveis perlítico, titânio, aços duros temperados e outros materiais com a dureza maior que HRB 100.
	D	Cone de diamante	98.07 (10)	980.7 (100)	Aço fino e médio temperado e ferro maleável perlítico.
	E	Esfera de aço endurecido – 3.175 mm (1/8 in)	98.07 (10)	980.7 (100)	Ferros fundidos, ligas de alumínio e magnésio e metais de rolamento.
	F	Esfera de aço endurecido – 1.588 mm (1/16 in)	98.07 (10)	588.4 (60)	Ligas de cobre recozido e folhas de aços macios.
	G	Esfera de aço endurecido – 1.588 mm (1/16 in)	98.07 (10)	1471 (150)	Aços maleáveis, ligas de cobre-níquel e zinco e ligas de cobre-níquel.
	H	Esfera de aço endurecido – 3.175 mm (1/8 in)	98.07 (10)	588.4 (60)	Alumínio e zinco.
	K	Esfera de aço endurecido – 3.175 mm (1/8 in)	98.07 (10)	1471 (150)	Metais de rolamento e outros materiais muito macios ou finos. Utilize a menor esfera e maior carga para não haver efeito de borda na marca.
	L	Esfera de aço endurecido – 6.350 mm (1/4 in)	98.07 (10)	588.4 (60)	
	M	Esfera de aço endurecido – 6.350 mm (1/4 in)	98.07 (10)	980.7 (100)	
	P	Esfera de aço endurecido – 6.350 mm (1/4 in)	98.07 (10)	1471 (150)	
	R	Esfera de aço endurecido – 12.70 mm (1/2 in)	98.07 (10)	588.4 (60)	
	S	Esfera de aço endurecido – 12.70 mm (1/2 in)	98.07 (10)	980.7 (100)	
	V	Esfera de aço endurecido – 12.70 mm (1/2 in)	98.07 (10)	1471 (150)	

Escala superficial Rockwell	15N	Cone de diamante	29.42 (3)	147.1 (15)	Similar às escalas A, C e D, mas para material mais fino ou com revestimento mais duro.
	30N	Cone de diamante	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45N	Cone de diamante	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15T	Esfera de aço endurecido – 1.588 mm (1/16 in)	29.42 (3)	147.1 (15)	Similar às escalas B, F e G, mas para material fino.
	30T	Esfera de aço endurecido – 1.588 mm (1/16 in)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45T	Esfera de aço endurecido – 1.588 mm (1/16 in)	29.42 (3)	441.3 (45)	Similar às escalas B, F e G, mas para material fino.
	15W	Esfera de aço endurecido – 3.175 mm (1/8 in)	29.42 (3)	147.1 (15)	Materiais muito macios.
	30W	Esfera de aço endurecido – 3.175 mm (1/8 in)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45W	Esfera de aço endurecido – 3.175 mm (1/8 in)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15N	Esfera de aço endurecido – 6.350 mm (1/4 in)	29.42 (3)	147.1 (15)	
	30X	Esfera de aço endurecido – 6.350 mm (1/4 in)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45X	Esfera de aço endurecido – 6.350 mm (1/4 in)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15Y	Esfera de aço endurecido – 12.70 mm (1/2 in)	29.42 (3)	147.1 (15)	
	30Y	Esfera de aço endurecido – 12.70 mm (1/2 in)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	15T	Esfera de aço endurecido – 12.70 mm (1/2 in)	29.42 (3)	441.3 (45)	

A escala de dureza pode ser mensurada por uma equação que atende aos requisitos supracitados de escala (normal ou superficial) e o tipo de indentador. O principal parâmetro a ser definido é o h, que é a diferença entre profundidade causada pela pré-carga e da carga de penetração. Com o indentador cone diamante, para a escala de dureza regular utiliza-se a equação 2.3 e, para escala de dureza superficial, a equação 2.4, conforme são abaixo descritas.

$$HR_{\text{conregular}} = 100 - \frac{h}{0,002} \quad (2.3)$$

$$HR_{\text{consuperficial}} = 100 - \frac{h}{0,001} \quad (2.4)$$

Caso o indentador seja de esfera de material endurecido, segue outra equação para dureza conforme a sua categoria (equação 2.5 e equação 2.6), também dependente da profundidade de indetação.

$$HR_{\text{bolregular}} = 130 - \frac{h}{0,002} \quad (2.5)$$

$$HR_{\text{bolsuperficial}} = 100 - \frac{h}{0,001} \quad (2.6)$$

Deve-se observar que o tipo de indentador é independente da escala da dureza superficial. Levi (2003) diz que este é provavelmente o ensaio de dureza mais utilizado, por ser simples e autocontido, de modo que não há necessidade de leitura em microscópio, diminuindo assim os erros humanos. Segundo Souza (1982), o corpo de prova deve ter a espessura de, no mínimo, dez vezes maior do que a profundidade de impressão, para que a peça não seja danificada.

2.3.3 DUREZA VICKERS

Conforme a norma *ASTM E92 - Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*, o teste de dureza Vickers é a penetração do material de teste, com um indentador de diamante, sob a forma de uma pirâmide com uma base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas submetidas a uma força de ensaio entre 1 kgf e 120 kgf, durante 10 a 15 segundos, conforme a Figura 2.4.

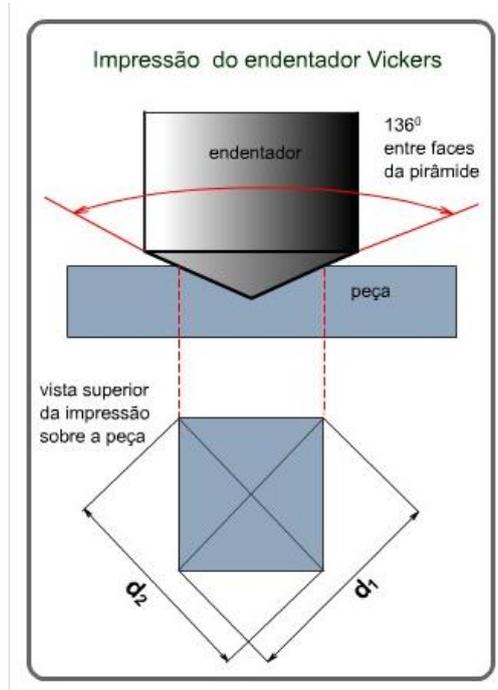


Figura 2.4 - Esquemático do teste de dureza Vickers. (Fonte: CIMM)

As duas diagonais da indentação, deixadas na superfície do material após a remoção da carga, são medidas usando um microscópio e a sua média calculada. A área das superfícies inclinadas da indentação é calculada. A dureza de Vickers é o quociente obtido pela divisão da carga (F), em kgf, pela área milímetro quadrado de recuo (d^2), conforme a equação 2.7.

$$HV = 2 F \sin \frac{136^\circ}{d^2} \quad (2.7)$$

As principais vantagens do método Vickers, segundo Souza (1982) são: escala contínua; impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça; grande precisão na medida, que é um problema no teste de dureza Brinell; deformação nula do penetrador de diamante; existência de apenas uma escala de dureza, diferente da escala de dureza Rockwell; aplicação para toda a gama de durezas encontradas nos diversos materiais; aplicação em qualquer espessura de material podendo medir, portanto, durezas superficiais.

Há vantagens e desvantagens para se utilizar um teste de dureza em relação ao outro. Por exemplo, a dureza Brinell é a mais utilizada por ser um teste mais simples comparado às outras, porém os resultados podem ser lidos errados, devido a escolha equivocada do indutor, pois ele pode produzir marcas maiores do que o real. A dureza Vickers tem vantagem em relação às outras pois seu indutor é de diamante e de estrutura piramidal produzindo marcas mais realistas, ou seja, não produzem marcas plásticas e possui uma escala contínua. A desvantagem é que em materiais anisotrópicos a marca pode ser influenciada pelo comportamento do material. A dureza Rockwell tem uma gama de ensaios e

condições abrangendo a maior parte dos ensaios, mas isso implica em várias escalas e ensaios mais demorados, porém é possível se avaliar superficialmente.

2.4 TEORIA CLÁSSICA DE MECÂNICA DO CONTATO

Mecânica de contato é o estudo da deformação de sólidos que se tocam em um ou mais pontos, a mais notável foi formulada pelo Heinrich Hertz (1882). A formulação física e matemática do assunto é construída sobre a mecânica dos materiais e da mecânica do contínuo e se concentra em cálculos envolvendo corpos elásticos, viscoelásticos e plásticos em contato estático ou dinâmico (Shayanfar e Hadizadeh, 2012). Esta teoria é focada no desgaste não-adesivo na zona de contato. Para tal, deve seguir algumas hipóteses (Zhu, 2012):

- 1) as deformações são pequenas e dentro do limite elástico;
- 2) pelo menos um dos corpos pode ser considerado um meio-espaço elástico, ou seja, a área de contato é muito menor que o raio característico do corpo;
- 3) as superfícies são contínuas e não conformes e;
- 4) desconsiderar o atrito entre os corpos no contato.

2.4.1 CONTATO HERTZIANO ENTRE ESFERAS

A Figura 2.5 mostra a configuração de duas esferas, com raios diferentes, que estão em contato sob uma força F_c e ocasionam uma área de aplicação. A superfície da punção é assumida sem atrito, por isso, não há restrição ao deslocamento lateral do material sob o perfurador (Bhushan; A Williams; Dwyer-Joyce, 2013).

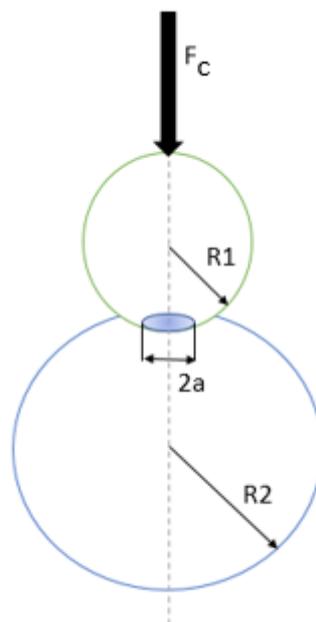


Figura 2.5 - Contato entre o indutor e o corpo de prova.

Hertz (1882) relaciona o crescimento da área de contato com a carga, a área circular resultante tem raio a , conforme a equação 2.8.

$$a = \sqrt[3]{\frac{3FR_{eq}}{4E^*}} \quad (2.8)$$

em que R_{eq} é raio de curvatura equivalente entre os raios das esferas, conforme a equação 2.9:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.9)$$

No caso particular, a esfera 2 pode ser aproximada de uma placa com raio 2 tendendo ao infinito, assim o raio equivalente é igual ao raio da esfera 1. O módulo de elasticidade de contato (E^*) pode ser definido como

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.10)$$

em que ν é o coeficiente de Poisson é igual a 0,28. A distribuição de pressão na área semielíptica (Figura 2.6), a pressão de contato e a tensão associada à mesma aumentam na proporção direta (Greenwood e Tripp, 1967).

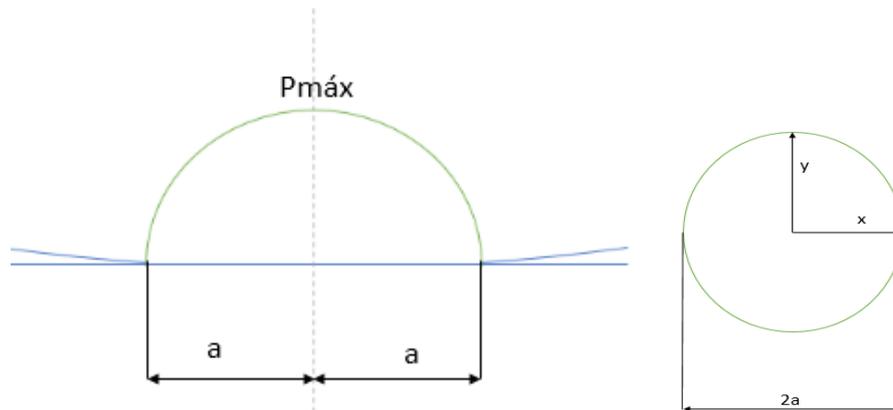


Figura 2.6 - Perfil de pressão no contato entre duas esferas.

Pode ser matematicamente descrita pela equação 2.11.

$$P(r) = P_{máx} \left\{ \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}} \right\} \quad (2.11)$$

em que o r é raio da elipse $\sqrt{y^2 + x^2}$, sendo a $P_{máx}$ a pressão máxima do contato que é a calculada segundo a equação 2.12:

$$P_{\text{máx}} = \frac{3F}{2\pi a^2} \quad (2.12)$$

Pela Figura 2.6 pode-se aferir que a $P_{\text{máx}}$ ocorre no ponto central do contato e, quando o raio da elipse é igual ao raio da área circular, a pressão de contato é nula. $P_{\text{máx}}$, por vezes, conhecido como tensão de Hertz (Fischer-Cripps, 2000). Sob esta carga, os centros das duas esferas se movem juntos com pequeno deslocamento (d), que é a metade do deslocamento efetivo, ou seja, o deslocamento da esfera 1 quando a esfera 2 está parada, onde:

$$d = \frac{s}{2} = \frac{a^2}{R_1} \quad (2.13)$$

As tensões principais são dadas por Johnson, Kendall e Roberts (1971) através das seguintes equações:

$$\sigma_x = -\frac{P_{\text{máx}}}{a} \left\{ (a^2 + 2\Delta^2)(a^2 + \Delta^2)^{-\frac{1}{2}} - 2\Delta \right\} \quad (2.14)$$

$$\sigma_y = -P_{\text{máx}}(a^2 + \Delta^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.16)$$

Embora o caso ideal necessite de perfis de superfície parabólicos, por implicação da análise hertziana, com a evolução ao longo do último século na área de Mecânica de Contato, essas restrições têm sofrido gradativas irrelevâncias a fim de se adequar a diferentes situações (*vide* Johnson, Kendall e Roberts, 1971).

Embora os problemas na região elástica-plástica sejam, em princípio, suscetíveis a análise (Bhushan; A Williams; Dwyer-Joyce, 2013), soluções são difíceis de serem obtidas para todos os problemas, mesmo para geometrias simples. As dificuldades surgem ao se tentar encontrar soluções que satisfaçam, simultaneamente, a ambos os estados, elástico e plástico, e que sejam compatíveis, também na fronteira plástico-elástica do material.

A observação experimental de que os deslocamentos são aproximadamente radiais, a partir do primeiro ponto de contato, sendo mais ou menos cilíndrica ou tendo contornos esféricos de igual origem, conduziu a um modelo aproximado simplificado (Johnson, Kendall e Roberts, 1971).

2.4.2 TESTE DE COMPRESSÃO

Os testes de compressão estática aplicam uma carga de compressão escalonada até a falha ou aplicam uma carga específica (Figura 2.7), que será mantida por um determinado período. Já nos testes de compressão dinâmica envolvem um ciclo entre duas (ou mais) condições de carga. Dependendo da

natureza da amostra ajudam a determinar a força de resistência final, a vida útil de serviço ou outras características críticas de desempenho do material. (MTS, 2018).

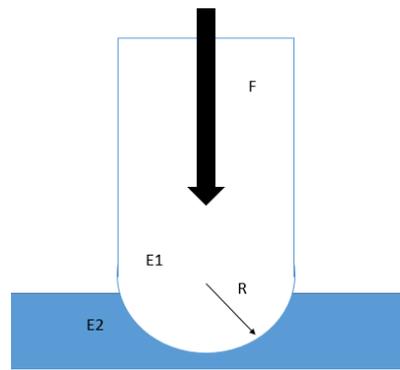


Figura 2.7 - Esquemático do teste de compressão.

Como descrito por Garcia (2000), nos materiais dúcteis, a compressão vai provocando uma deformação considerável, que prossegue até o corpo de prova se deformar e se transformar em um disco ou criando uma calota. Até a tensão de escoamento, o material tem comportamento elástico, porém, com o avanço da sapata, o corpo de prova endurece e ocorre um aumento do diâmetro da seção transversal (calota).

Este ensaio obedece à norma *ASTM E9 – Compression Testing of Metals*, que determina os parâmetros e os protocolos de ensaio. Assim, para melhor desempenho do ensaio, a amostra tem que estar bem centralizada para que a carga aplicada seja uniforme. Durante o ensaio, tanto a aplicação da carga, quanto o deslocamento das placas ou a deformação do corpo de prova, que deve ter uma espessura suficiente, deve ser monitorado continuamente. (MTS, 2018)

2.5 RUGOSIDADE

Toda superfície é composta, mesmo a mais plana possível, por três partes: forma, ondulação e rugosidade. Forma é a componente mais grosseira, mais fácil de observar, sendo a geometria da peça. Observando-se de perto uma superfície, vê-se que esta possui algumas ondulações e são, portanto, compostas de picos e vales, que são a terceira parte, a rugosidade da peça (Josso, Burton e Lalor, 2002). Portanto o material é composto de forma, ondulações e por fim, rugosidade, como explicitado na Figura 2.8.

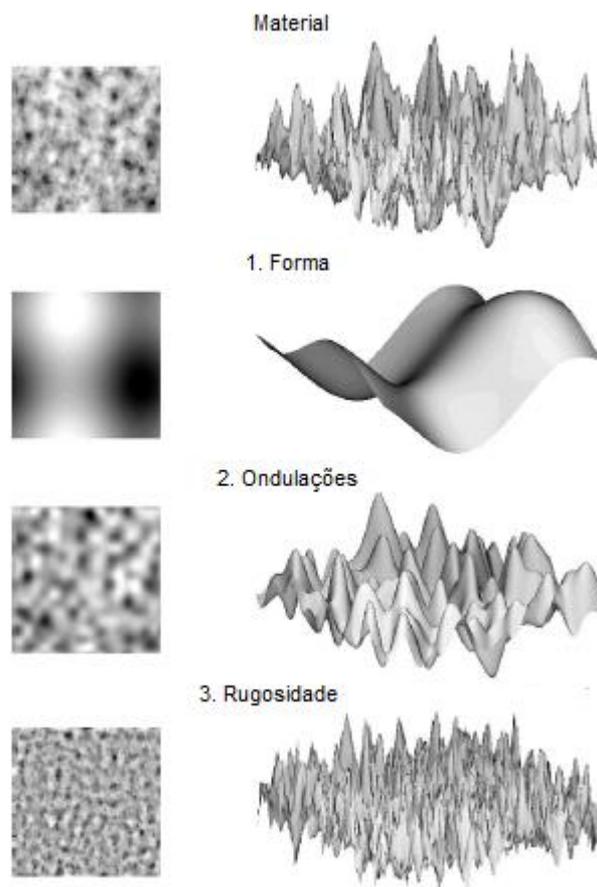


Figura 2.8 - Imagem de uma superfície, seguida da forma, ondulações e por fim rugosidade.

(Adaptada de Josso; Burton; Lalor, 2002)

A análise da rugosidade se torna muito importante, visto que ela influencia as propriedades de um componente, como a resistência à corrosão e ao desgaste. Quanto mais rugosa for a peça, maior será a taxa de corrosão (Gravalos *et al*, 2010). Para ferros fundidos, Israel (2005) conclui que a resistência ao desgaste não é proporcional à dureza do material, que se deve aos fatores tribológicos. A rugosidade tem influência de maneira significativa na determinação do coeficiente de atrito, caso seja significativo atrapalharia uma análise hertziana. (Martins *et al*, 2011).

A rugosidade pode ser medida mecânica ou opticamente. Os equipamentos mais utilizados para medida do parâmetro rugosidade superficial são rugosímetros, os quais podem ter, como princípio de funcionamento, o contato mecânico ou através do feixe de laser. A peça tem um comprimento total, e, para as medidas, delimita-se a região a ser medida (l_m), desprezando-se as pontas da peça. Em seguida, divide-se a região em cinco sub-regiões (l_c) e calcula-se uma linha média para o perfil no qual as regiões superiores são chamadas de picos e os sulcos, em relação à linha média, de vales, como mostra a Figura 2.9.

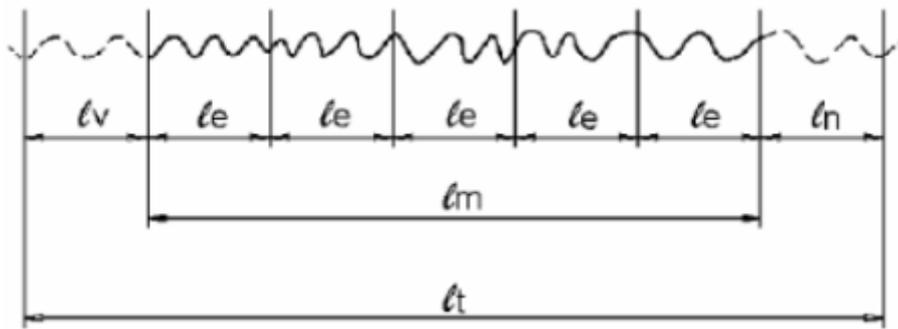


Figura 2.9 - Comprimentos para avaliação de rugosidade. (Fonte: Gravalos et al, 2010).

Quatro parâmetros básicos serão tratados a seguir para compreender a análise de rugosidade: desvio médio de rugosidade (R_a), altura média máxima do perfil (R_z), desvio médio quadrático (R_q) e coeficiente de simetria de rugosidade (R_{sk}), conforme Gadelmawla et. al (2002) a fabricante *Olympus Lext*, já que os ensaios ocorrerão no microscópico laser confocal.

2.5.1 DESVIO MÉDIO DE RUGOSIDADE (R_a)

É média aritmética dos valores absolutos das distâncias axiais em relação a linha média, que é a mesma da linha de forma como explicado anteriormente, do perfil de rugosidade dentro da região efetiva de medição (l_m), como a Figura 2.10 (Oliveira et al, 2000).

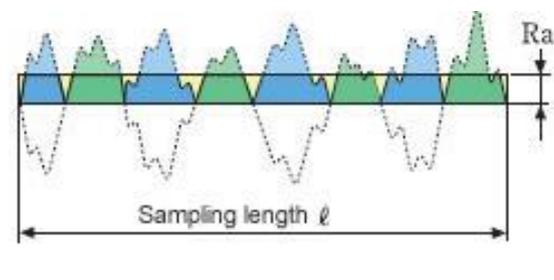


Figura 2.10 - Parâmetro de desvio médio de rugosidade (R_a).

(Fonte: *Olympus Scientific Solutions Americas*)

O parâmetro R_a também pode ser descrito matematicamente (equação 2.17) como a altura do retângulo cujo comprimento é igual ao comprimento total de medição (l_m) e cuja a área é igual entre as áreas limitadas pela linha média (Z) do perfil de rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2010) . A área de pico (A_p) é a área acima da linha média e área de vale (A_v) é também uma área, só que embaixo da linha média.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Z(x)| dx \quad (2.17)$$

Este desvio é utilizado quando for necessário o controle de rugosidade em linhas de produção, pois é um parâmetro de fácil obtenção. Quase todos os equipamentos possuem esse parâmetro e é um valor relacionado às curvas de Gauss que caracterizam a distribuição da amplitude. A desvantagem desse parâmetro é que não é possível distinguir se é um pico ou um vale.

Para se ter o comprimento medido para análise da rugosidade há uma relação entre o valor do desvio médio de rugosidade (R_a) e o tamanho do comprimento efetivo (*cutoff*), conforme mostra a Tabela 2.6. Para isso é necessário fazer uma análise preliminar de uma amostra, esse valor tem que ser no mínimo de 5 vezes o comprimento efetivo.

Tabela 2.6 - Parâmetro R_a o comprimento efetivo (l_c)

Parâmetro de rugosidade R_a	<i>Cutoff</i> (l_c)
Maior ou igual a 0,1 μm	0,25 mm
Maior que 0,1 a 2,0 μm	0,8 mm
Maior que 2,0 a 10,0 μm	2,5 mm
Maior que 10,0 μm	8,0 mm

2.5.2 DESVIO MÉDIO QUADRÁTICO (R_q)

É definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média dentro do *cutoff* (l_m). Ao fazer analogia com o parâmetro desvio médio de rugosidade (R_a), pode-se dizer que é similar, aos valores das axiais, elevados ao quadrado, e depois extraída a raiz quadrada da média, como explicitado na Figura 2.11.

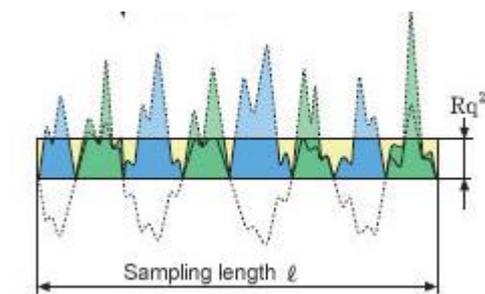


Figura 2.11 - Parâmetro de desvio médio quadrático (R_q).

(Fonte: Olympus Scientific Solutions Americas)

Pode-se traduzir matematicamente esse parâmetro em que a altura (Z) é quadrático e depois efetua a raiz quadra, assim opera-se um desvio médio quadrático, conforme a equação 2.18, é feito no comprimento medido.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} Z(x)^2 dx} \quad (2.18)$$

Este parâmetro é, aproximadamente, 11% maior que o R_a , portanto pode-se fazer as mesmas comparações que o desvio médio, ou seja, quanto menor o valor de R_q menos rugosa é a superfície. Atualmente existem softwares que realizam esses cálculos em que os resultados são mais precisos.

2.5.3 COEFICIENTE DE SIMETRIA DE RUGOSIDADE (R_{sk})

Expressa a média cúbica do tamanho dos picos e vales em relação à linha média, significando grau de inclinação e a simetria entre os comprimentos das distâncias entre a coordenada 'y'. A assimetria da distribuição é o critério de avaliação do formato (ou deformação) da curva de distribuição das amplitudes das irregularidades em relação à linha de referência, no comprimento de medição conforme a Figura 2.12.

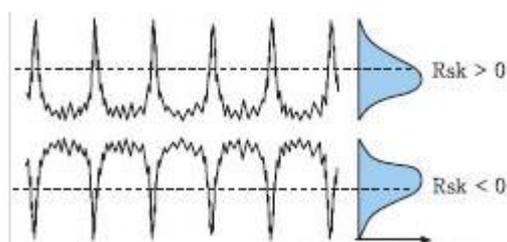


Figura 2.12 - Coeficiente de simetria de rugosidade (R_{sk}).

(Fonte: *Olympus Scientific Solutions Americas*)

Matematicamente o coeficiente de simetria (equação. 2.19) é a média cúbica de $Z(x)$ em um comprimento de amostragem tornado adimensional como o cubo da raiz quadrada média da altura, R_q .

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} (Z(x))^3 dx \right] \quad (2.19)$$

Há três possibilidades de valores para este parâmetro: nulo, positivo e negativo. E as conclusões sobre isso são explicadas a seguir, como informado pelo fabricante *Olympus Lext* (2018):

- $R_{sk} = 0$; a distribuição é normal em relação a linha média, ou seja, o comprimento dos picos e vales é praticamente o mesmo;
- $R_{sk} > 0$; a distribuição está inclinada para baixo em relação a linha média, ou seja, os comprimentos dos vales são, em maior parte, superiores aos do pico;
- $R_{sk} < 0$; a distribuição está inclinada para cima em relação a linha média, ou seja, ocorre o inverso do item anterior.

2.5.4 ALTURA MÉDIA MÁXIMA DO PERFIL (R_z)

Este parâmetro é mais sensível a altos picos ou vales profundos do que o desvio médio rugosidade (R_a), é definido por dois métodos de acordo com o sistema de definição. No sistema internacional ISSO é a diferença entre a altura média dos cinco picos mais altos e cinco vales mais baixos avaliados no *cutoff*.

Isto expressa a soma do valor máximo da altura do pico do perfil Z_p na curva do perfil, e o valor máximo da profundidade do vale do perfil Z_v em um *cutoff*.

- Pico do perfil: a parte acima da linha média (eixo X) da curva do perfil (na direção do lado do material em direção ao lado do espaço).
- Vale do perfil: a parte abaixo da linha média (eixo X) da curva do perfil (na direção do lado do espaço em direção ao lado do material).

Este parâmetro é frequentemente usado para avaliação de brilho, resistência de superfície, tratabilidade de superfície, força de atrito, resistência de contato elétrico, etc.

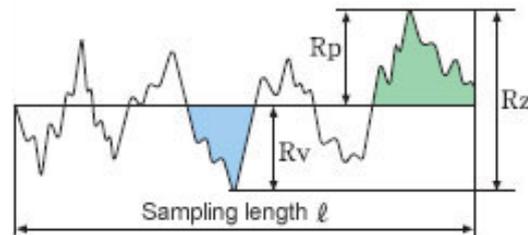


Figura 2.13 - Parâmetro de altura média máxima do perfil (R_z).

(Fonte: *Olympus lext*)

A definição matemática em que é a soma da rugosidade R_p (altura máxima de pico do perfil) e R_v (profundidade máxima do vale do perfil).

$$R_z = R_v + R_p \quad (2.20)$$

A relação entre os parâmetros de R_z é de quatro vezes R_a , (*Mitsubishi Materials Corporation*, 2018) portanto $0,04 \mu\text{m}$ é de uma peça retificada enquanto 400μ de uma peça desbastada.

3 MÉTODOS

Este capítulo apresenta preparo das amostras e os métodos de análise utilizado para cada parâmetros através dos ensaios de dureza superficial, de compressão e de rugosidade superficial.

3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS

O primeiro passo na análise de uma amostra é selecionar uma que seja a mais representativa possível. É crucial para o sucesso na análise e o segundo, tão importante quanto o primeiro, é a preparação correta da mesma.

A amostra analisada é pequena, portanto, não foi necessário cortá-la. Caso a peça seja muito grande é necessário este procedimento. Quando for muito pequena deve-se embuti-la, com um molde de resina de apoio que não interfere na metalografia da peça, só em sua geometria, facilitando, assim, o manuseio do espécime.

A etapa geralmente considerada mais importante na preparação é o lixamento, no qual todo cuidado deve ser tomado a fim de se minimizar danos à peça. O lixamento consiste na abrasão da superfície da amostra contra uma lixa lubrificada com água (supondo que a água não afete negativamente o metal). É desenvolvida uma superfície plana, no caso a Politriz, com o mínimo de pressão na peça para que não se crie barrigas ou planos, como mostrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Amostra no processo de lixamento na Politriz.

A lixas de número 120, 280, 400, 500, 600, 800, 1200 e 1500, de maior a menor granulometria, quando a lixa for trocada tem que se girar a peça em 90° afim de se eliminar as ranhuras da peça causadas pela lixa anterior.

O polimento é a finalização desse processo, a peça será polida na mesma Politriz, mas com um pano de feltro e uma solução de alumina de 0,5 μm para se obter a estrutura mais espelhada possível, depois levado com detergente líquido e seco com papel.

3.2 ENSAIOS DE DUREZA

Utilizando o microdurômetro *DuraScan*, da EMCOTESTE (Figura 3.2), proceder-se-á ao teste de microdureza Vickers, através do programa que já vem instalado na própria máquina *Ecos Workflow*. Então a amostra é posicionada no microscópio, com a lente de aumento de 10x e efetuar o ensaio com o cuidado de não realizar na parte central, pois lá será realizada o ensaio de compressão. Com a posição definida será selecionada a carga para que se proceda ao ensaio.



Figura 3.2 – Microdurômetro *DuraScan*, da EMCOTESTE.

Primeiro, aplica-se uma pré-carga e, depois, a carga. O tempo já é programado pelo *software*, causando a impressão que a análise será feita através da lente de aumento de 40x. As pontas do losango estarão definidas e o programa (conhecendo o tamanho das diagonais) calcula automaticamente o número da microdureza Vickers, que segue a mesma equação da dureza (equação 2.7). Serão efetuadas pelo menos três medições e uma média entre os valores. Estes serão, posteriormente, organizados em uma tabela. Com isso pode-se determinar a microdureza Vickers deste material.

Utilizando o durômetro universal, da Zwick/Roell (Figura 3.3), do Laboratório de Materiais, do SG-09, será feito o teste dureza superficial Rockwell 30T em que o indentador é de esfera de aço endurecido com 1/16 polegadas, em que o pré-carga de 3,0 kgf e carga de 30,0 kgf, conforme a norma *ASTM E3-90*. Serão efetuadas cinco medidas e uma média entre os valores, com isso pode-se determinar a dureza superficial.



Figura 3.3 - durômetro universal, da Zwick/Roell.

Utilizando a equação 3.1 é possível fazer uma comparação experimental e numérica, que a diferença entre a profundidade (h) causada pela pré-carga e a carga é obtida neste ensaio.

$$HR_{\text{bolsuperficial}} = 100 - \frac{h}{0,001} \quad (3.1)$$

3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão das pastilhas é realizado no em uma MTS 809, própria para este teste com o suporte descrito em Lins e Amaral (2017). A amostra e a sapata são do mesmo material (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Sapata e a pastilha de material ASTM a352 CA6NM

A interação entre o corpo de prova (pastilha), que está alojado dentro do suporte (ver Figura 3.6), e o equipamento será feita entre o contato da sapata de ponta circular na parte central.

A Figura 3.5 mostra o esquema da pastilha, na qual o ensaio de desgaste ocorrerá na parte azul clara.



Figura 3.5 - Pastilha com as áreas de ensaio indicado.

O procedimento experimental é dividido nas seguintes etapas:

1. montar as cunhas nas garras da máquina;
2. acoplar o suporte na parte inferior e a sapata na superior;
3. limitar a pressão das cunhas, utilizou-se de 8 MPa;
4. inicializar o software *station manager*;
5. ajustar a altura para que a sapata no corpo de prova;
6. configurar o ensaio para monotônico, axial e as condições de parada;
7. resetar o deslocamento e a força residual para que a referência seja zero;
8. iniciar o teste;
9. acompanhá-lo no programa a curva de avanço e carga.

As cargas de compressão aplicadas foram 500, 1000 e 2000 N, e as condições impostas foram tais que a carga de compressão não poderia ultrapassar a carga e o deslocamento não poderia ser de 5

milímetros. A Figura 3.6 mostra a montagem do equipamento para realização do ensaio, ressaltando que a estrutura de suporte hertziana para o corpo de prova foi projetada por Lins e Amaral (2017).

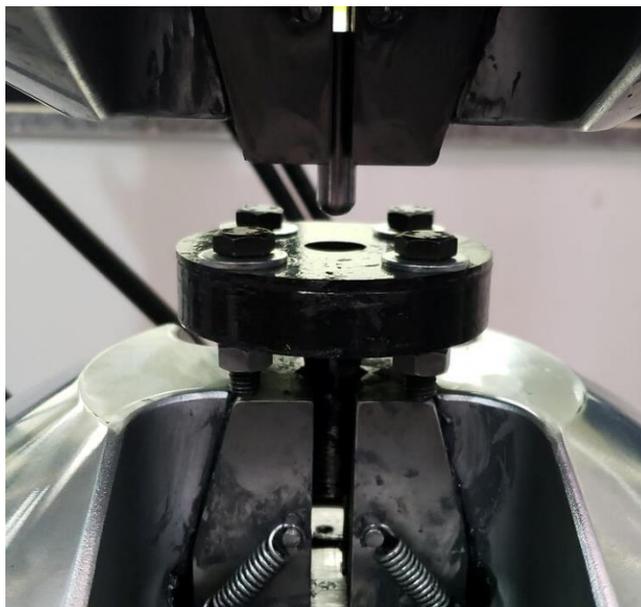


Figura 3.6 - Montagem para ensaio de compressão.

Assim os dados foram organizados em uma tabela conforme a força axial, tempo de deslocamento, força axial efetiva e deslocamento efetivo. Com esses dados pode aplicar a Teoria da Mecânica do Contato e achar o raio da área de contato, pressão máxima e deslocamento.

3.4 ENSAIOS DE RUGOSIDADE

A *priori* será feito uma análise de rugosidade da face superior utilizando o microscópio confocal *Lext 3D measuring laser* com um aumento de 5x e os dados obtidos serão lidos através do software *OLS4100 Olympus*, como mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Microscópio confocal Lext 3D measuring laser

A Figura 3.8 é a pastilha que será analisada em todos os ensaios.



Figura 3.8 - Amostra de a352 CA6NM em formato de pastilha

Os quatro parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_{sk} e R_z) serão plotados em uma Tabela após o ensaio de desgaste que ocorrerá na parte central (será explicado no tópico a seguir), primeiramente em relação ao eixo x. Serão feitas três análises, a central e nas bordas do ensaio de compressão (Figura 3.9).

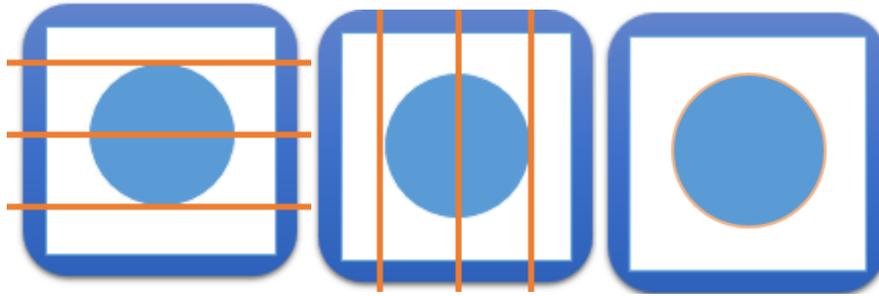


Figura 3.9 - Análise de rugosidade em relação ao eixo x, y e na borda.

Assim será possível analisar os parâmetros de rugosidade se alteram em relação a direção e as bordas.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos para cada ensaio de microdureza e dureza superficial, compressão e rugosidade e analisando cada um.

Duas análises preliminares foram realizadas: teste de microdureza Vickers e teste de rugosidade no microscópio confocal com auxílio do *software Olympus lext*.

4.1 TESTE DE MICRODUREZA VICKERS

Foram realizadas três leituras de microdureza foram feitas no *DuraScan* da EMCOTEST com amostra 1 que não é a pastilha, mas um pedaço do material denominado de amostra 0, segundo a Figura 4.1.

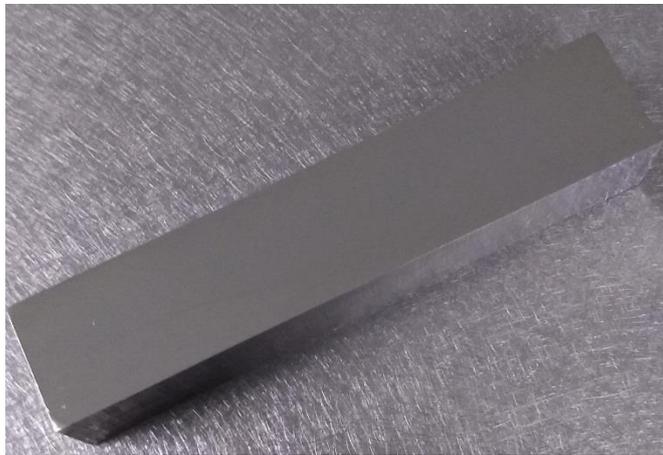


Figura 4.1 - Amostra de ASTM A352 CA6NM.

A Figura 4.2 ilustra a impressão causada pelo teste, com o zoom de 10x, com uma carga de 2,0 kgf.

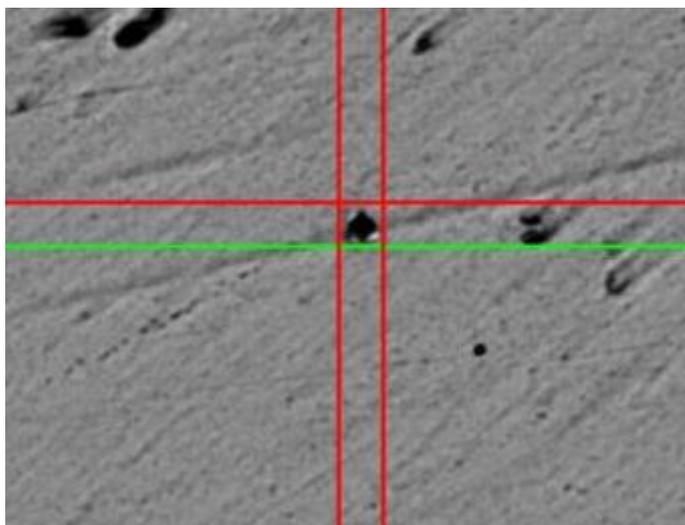


Figura 4.2 - Impressão do teste de microdureza Vickers na amostra 0.

Os resultados obtidos, incluindo uma média entre as medidas, foram organizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados de microdureza Vickers da amostra 1 com a carga de 2 kgf.

Medida	Valor
1	55088 HV 2
2	50265 HV 2
3	58699 HV 2
Média	54684 HV 2

Os números parecem absurdos, portanto, o mesmo teste foi realizado agora com uma carga menor, de 0,2 kgf. A Tabela 4.2 mostra os resultados com a mudança de carga.

Tabela 4.2 - Resultados de microdureza Vickers da amostra 1 com a carga de 0,2 kgf.

Medida	Valor
1	5870 HV 0,2
2	5870 HV 0,2
3	5026 HV 0,2
Média	5589 HV 0,2

Não há conhecimento na literatura de um material com esse valor de dureza. Assim realizou o ensaio de dureza Brinell, já que esse valor já é conhecido para saber se o material teria sofrido algum tratamento térmico desconhecido, afim de sanar esta dúvida.

Para o ensaio de dureza no durômetro do tipo Brinell com um valor de carga indicado é função do diâmetro do indentador, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Carga aplicada no ensaio em função do diâmetro da esfera do indentador.

Diâmetro da esfera (D_e) (mm)	F (kgf) = 2,5 D ²	F (kgf) = 5 D ²	F (kgf) = 10 D ²	F (kgf) = 30 D ²
10	250	500	1000	3000
5	62.5	125	250	750
2,5	15.625	31.25	62.5	187.5

O teste foi feito com um indentador esférico de tungstênio de 2,5 milímetros de diâmetro, a carga aplicada sendo de 15,625 kgf e posteriormente os resultados foram organizados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados de dureza Brinell da amostra 1 com carga de 15,625 kgf com um indentador de 2,5 mm de diâmetro de tungstênio.

Medidas	Resultado
1	240,3 HB 15,625
2	256,4 HB 15,625
3	247,3 HB 15,625
Média	251,4 HB 15,625

Conforme o banco de dados do *Material Properties Database* (MakeItFrom.com) esta é a dureza esperada para o aço ASTM A352 CA6NM. Esse tipo de teste (microdureza Vickers) não atende às expectativas, já que os resultados foram irrealistas, ao se analisar a superfície, portanto, optará por fazer ensaios de dureza Rockwell por ser este o único método, além da dureza de Vickers, capaz de analisar a dureza superficial.

4.2 TESTE DE DUREZA SUPERFICIAL ROCKWELL

Foram realizadas cinco medições em cada pastilha nas condições do ensaio de dureza superficial Rockwell 30T, com o indentador de esfera de aço endurecido de 1/16 in de diâmetro e com a pré-carga e carga, respectivamente, de 3 e 30 kgf, na área branca como indicado na Figura 4.3 e assim organizado na Tabela 4.5.

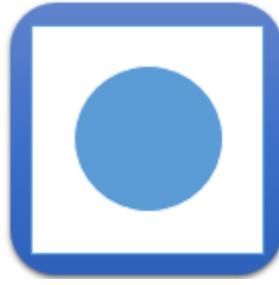


Figura 4.3 - Área de ensaio (branca) de dureza superficial.

Tabela 4.5 - Dureza HR30T e profundidade (h) de cada amostra, com médias de dureza e profundidade.

	Medida	HR30T	Média da dureza	h (µm)	Média da profundidade \bar{h} (µm)
Amostra 1	1ª	83.6	84.26 ± 0.56	16.45	15.66 ± 0.54
	2ª	83.6		16.15	
	3ª	84.9		15.05	
	4ª	84.8		15.20	
	5ª	84.4		15.45	
Amostra 2	1ª	85.5	85.05 ± 0.40	14.55	14.94 ± 0.38
	2ª	85.2		14.80	
	3ª	85.5		14.55	
	4ª	84.6		15.40	
	5ª	84.6		15.40	
Amostra 3	1ª	81.6	81.92 ± 0,60	18.45	18.09 ± 0.59
	2ª	81.6		18.35	
	3ª	81.2		18.80	
	4ª	82.3		17.70	
	5ª	82.9		17.15	

A dureza superficial pode ser calculada pela equação 4.1, a Tabela 4.6 contém as peças com suas respectivas durezas.

$$HR_{\text{bolsuperficial}} = 100 - \frac{\bar{h}}{0,001} \quad (4.1)$$

em que \bar{h} é a média da profundidade, em micrometros.

Tabela 4.6 - Dureza superficial HR30T para cada amostra.

	Dureza calculada (HR30T)
Amostra 1	84,34
Amostra 2	85,06
Amostra 3	81,91

Infere-se que os valores não divergem em mais de 0,1%, portanto o experimental está bem próximo ao teórico. Conforme a *MatWeb – Material Propriety Data*, consegue-se fazer comparação entre as durezas, o cobre (UNS C42500) com têmpera H01 (HR30T 56), em que a dureza superficial do material estudado é maior que este.

Por não ser uma escala muito utilizada, a norma *ASTM E140-12b^{e1} - Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness* no anexo A2 no qual contém equações de conversão da escala HR30T para HRB para aços não-austenítico, que é o caso, em que a equação 4.2 será apresentada.

$$\text{HRB} = -24.2568 + 1.49484 * (\text{HR30T}) \quad (4.2)$$

Com essa conversão, pode-se obter os resultados (Tabela 4.7) para cada amostra de ASTM A352 CA6NM.

Tabela 4.7 - Dureza Rockwell B (HRB) transformada da HR30T.

	Dureza HRB
Amostra 1	101,70
Amostra 2	102,88
Amostra 3	98,20
Média	100,92 ± 1,81

Assim a gama de materiais com essa propriedade conhecida amplia-se, conforme a *Material Properties Database* o aço em estudo tem propriedades similares ao aço inoxidável AISI 405 e UNS S42035, escolheu mais 5 materiais usuais, listado na Tabela 4.8, para que pudesse fazer uma comparação com o material de estudo.

Tabela 4.8 - Dureza Rockwell B (HRB) para materiais.

Materiais	Dureza HRB
Aço 1020 laminado a frio	68
Aço 1045, laminado a quente de 19 - 32 mm espessura	84
Alumínio 2014, T4	67
Cobre H01	60
Aço inoxidável 302, recozido	85
Aço inoxidável AISI 405	100
Aço Inoxidável UNS S42035	82.2

Infere-se que a liga estudada é mais dura que os materiais comuns e o aço inoxidável UNS S42035, mas possui a mesma dureza HRB do aço inoxidável AISI 405, que é o máximo da escala. Duas das três amostras tem a dureza maior que a escala de HRB, que é no máximo de 100 HRB.

4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Utilizando as equações definidas por Hertz (1882) apresentada no Capítulo 2, com a ferramenta *MatLab* criou-se um código para calcular o raio da área de contato, pressão máxima e deslocamento teórico, para este ensaio com as propriedades do material: o módulo de elasticidade (E) de 200 GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0,28 e o raio da sapata (R_1) de 5 milímetros, organizou os resultados gerados pela rotina do *MatLab* (anexo 1) em que se obteve os valores teóricos, na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Raio da área de contato, pressão máxima e o deslocamento analítico para cada amostra.

		Teórico			
		Carga (N)	Raio da área de contato (mm)	Pressão máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
Amostras	500	0,2590	3559,4	0,0134	
	1000	0,3264	4484,6	0,0213	
	2000	0,4112	5650,2	0,0338	

Após o ensaio de compressão o arquivo com força e deslocamento efetivo da sapata foi gerado. Para o gráfico de tensão e deslocamento, a tensão média foi calculada pela equação 4.3.

$$\sigma(\mathbf{a}) = \frac{F_c}{A_c} \quad (4.3)$$

Em que F_c é a força aplicada e a A_c é a área de contato. Primeiramente, considerou que a área de contato seja uma circunferência com a raio da área de contato (a), em milímetros, conforme a equação 4.4.

$$\sigma(\mathbf{a}) = \frac{F_c}{\pi a^2} \quad (4.4)$$

Utilizando a relação entre o deslocamento efetivo da sapata (s), o raio da área de contato (a) e o raio (R_1) de 5 milímetros, como mostrado na equação 4.5.

$$\mathbf{a} = \sqrt{R_1 s / 2} \quad (4.5)$$

Fazendo as manipulações necessárias, a tensão média para cada ponto pode ser descrita como a equação 4.6.

$$\sigma(\mathbf{s}) = \frac{F_c}{\pi R_1 s / 2} \quad (4.6)$$

Assim o gráfico de tensão média e deslocamento foi plotado para cada carga (Figuras 4.4, 4.5 e 4.6).

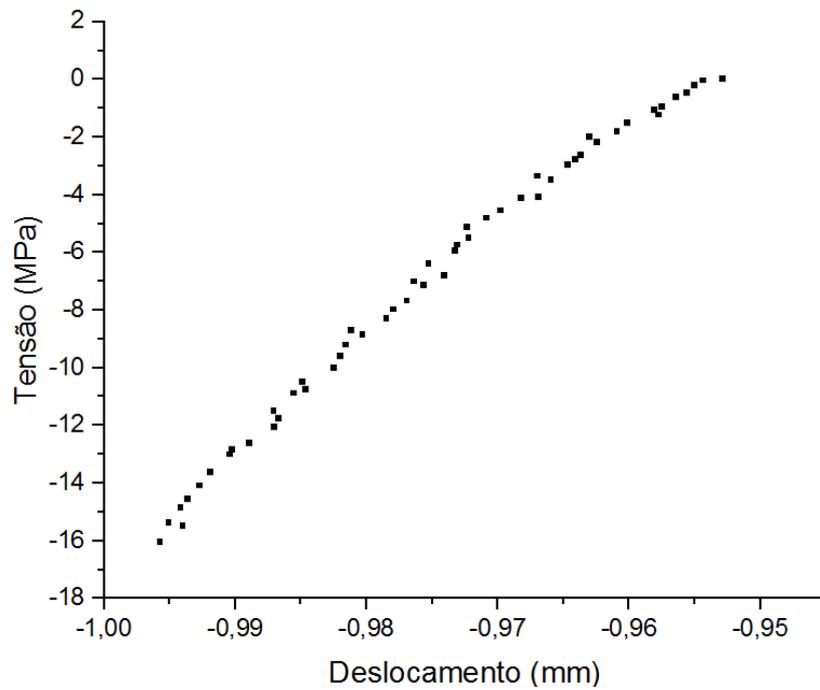


Figura 4.4- Ensaio 1 de carga de 500 N por deslocamento em mm.

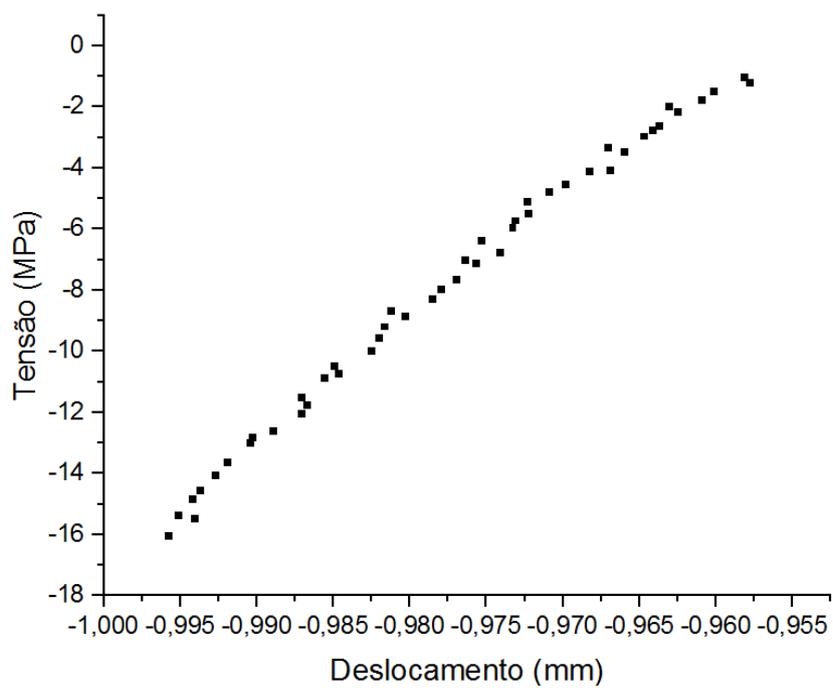


Figura 4.5 - Ensaio 2 de carga de 1000 N por deslocamento em mm.

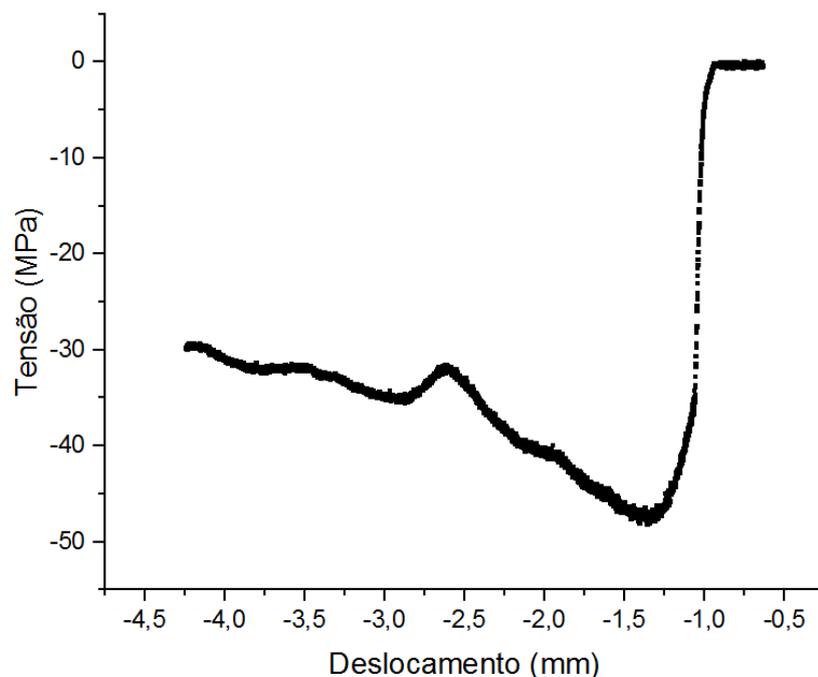


Figura 4.6 - Ensaio 3 de carga de 2000 N por deslocamento em mm.

A Teoria do Contato de Hertz tem como um dos postulados ocorrer na zona elástica, sendo que esta está nos 0,02% do deslocamento no gráfico tensão *versus* deslocamento, assim analisou o deslocamento nesta curva para atender ao critério hertziano. Então o deslocamento efetivo da sapata (s) foi obtido graficamente, com gráficos gerados pelo *OringinLab* que possui ferramenta de análise de pontos (no começo e no final da zona elástica), permitindo o cálculo do raio da área de contato (equação. 4.7)

$$a = \sqrt{R_1 d} \quad (4.7)$$

Lembrando que o deslocamento (d) é a metade do avanço da sapata (s), como mostrado anteriormente (ver equação 4.5). Calculou-se a pressão máxima experimental, também criando um código no *MatLab*, e os dados encontram-se organizados para cada amostra, respectivamente, na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Raio da área de contato, pressão máxima e o deslocamento experimental para cada amostra.

		Experimental		
		Deslocamento (mm)	Pressão máxima (MPa)	Raio da área de contato (mm)
Amostras	Carga (N)			
	500	0,2590	2722,0	0,2962
	1000	0,3264	5925,7	0,2864
	2000	0,4112	4899,6	0,4416

O erro comparativo entre os resultados experimentais obtidos e a previsão analítica são quantificados pela seguinte equação 4.8.

$$\text{Erro (\%)} = 100 * \frac{|a_{\text{teo}} - a_{\text{exp}}|}{a_{\text{teo}}} \quad (4.8)$$

em que a_{teo} é o raio da área de contato teórico e o a_{exp} é o raio da área de contato experimental e os resultados são listados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Comparação entre o raio da área de contato teórica e experimental.

	Carga (N)	Raio da área de contato (mm)		Erro experimental (%)
		Teórico	Experimental	
Amostras	500	0,2590	0,2962	14,35
	1000	0,3264	0,2864	12,26
	2000	0,4112	0,4416	7,38

Percebe-se que os valores experimentais e teóricos divergem, no máximo, em 15% e que podem ser explicadas pela presença de atrito, ocorrência natural, por melhor que seja a usinagem da ferramenta (Callister, 2002). Também pode ser atribuído a deformação plástica que ocorreu na ferramenta, no gráfico (Figura 4.6) da amostra 3 é possível notar os dois patamares de deformação plástica, o primeiro associado à amostra e o segundo, à ferramenta.

Após ensaio observou-se que cada amostra teve uma marca plástica, a qual foi levada ao microscópico confocal, para se obter medidas de profundidade, nas coordenadas x e y, respectivamente, com aumento de 20x, conforme o perfil representativo com a carga de 1000 N (ver Figura 4.7).

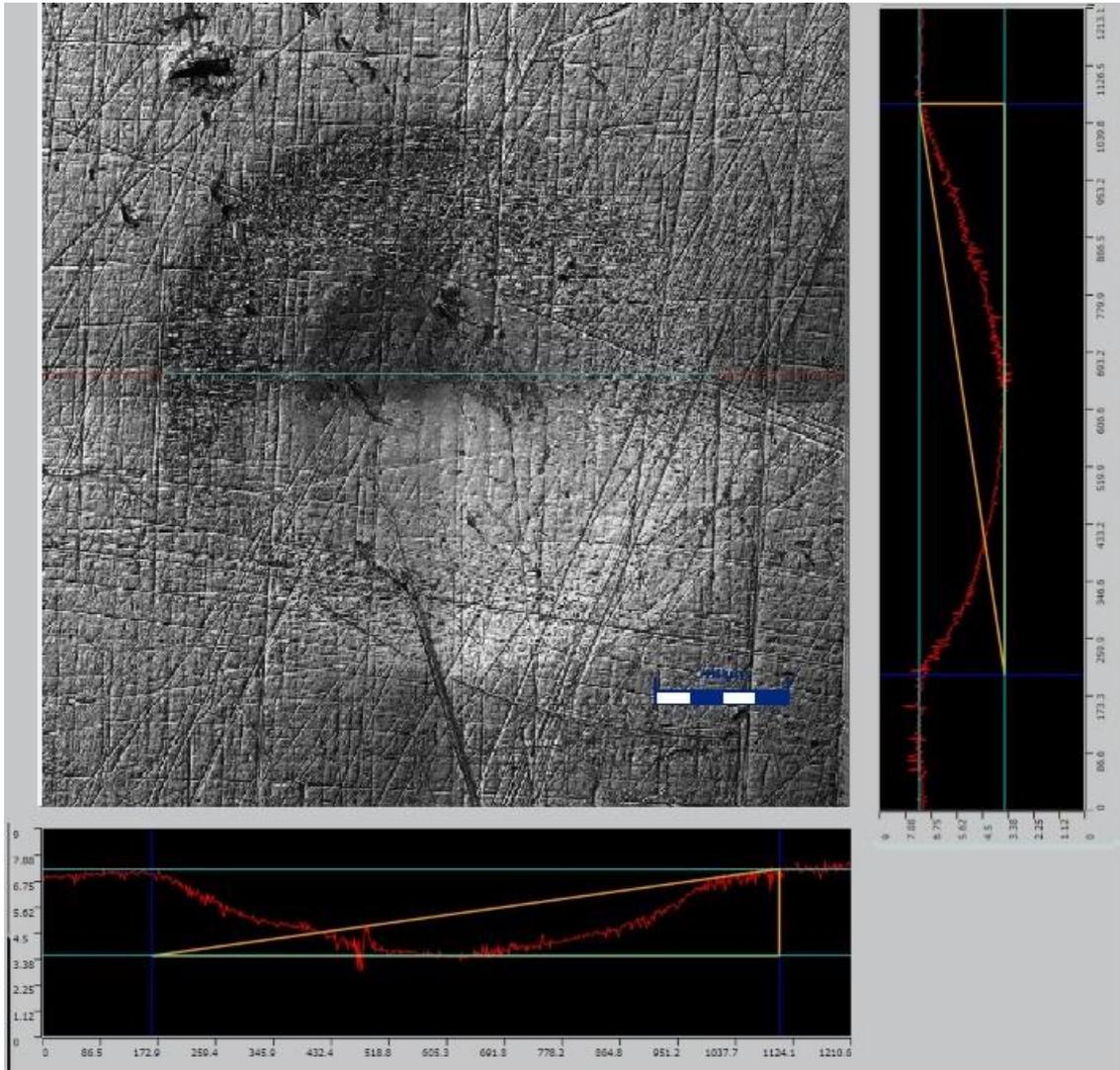


Figura 4.7 - Perfil representativo das medições de profundidade nos eixos x e y - carga de 1000 N.

Os resultados das medições no microscópico confocal foram organizados na Tabela 4.12, de acordo com o eixo x e y e a média entre os valores.

Tabela 4.12 - Profundidade experimental para cada amostra, respectivamente, em relação ao eixo x e y e a média

	Profundidade, h (μm)		
	h_x	h_y	$h_{\text{méd}}$
Amostra 1 (500 N)	2,111	2,074	$2,0925 \pm 0,019$
Amostra 2 (1000 N)	3,755	3,757	$3,756 \pm 0,001$
Amostra 3 (2000 N)	11,182	11,491	$11,336 \pm 0,155$

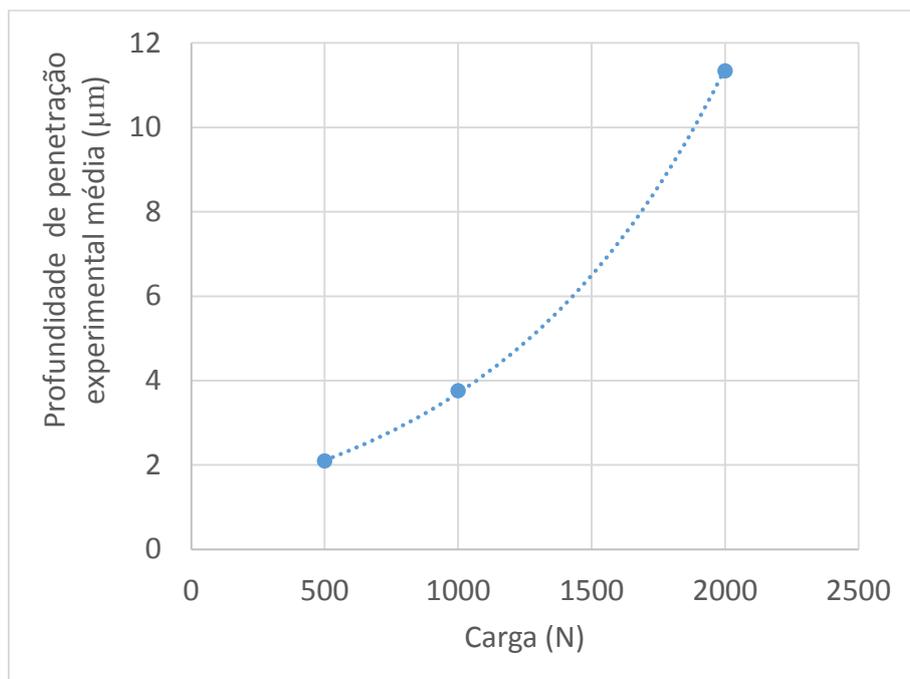


Figura 4.8 - Gráfico da profundidade, em μm , pela carga aplicada (N).

Há uma relação polinomial entre a profundidade e a carga aplicada, como mostrado na Figura 4.8, já a Tabela 4.13 mostra a área da calota (deformação plástica) e os comprimentos para cada caso, utilizou-se do software OLS4100 *Olympus*.

Tabela 4.13 - Área da calota e os comprimentos em x e y e média para cada amostra.

	Área (mm^2)	Comprimento em x (mm)	Comprimento em y (mm)	Média (mm)
Amostra 1	0,3078	0,623	0,629	$0,626 \pm 0,003$
Amostra 2	0,5165	0,806	0,816	$0,811 \pm 0,005$
Amostra 3	0,9979	1,125	1,139	$1,132 \pm 0,007$

A Figura 4.9 representando graficamente os resultado reportados da área deformada para cada carga.

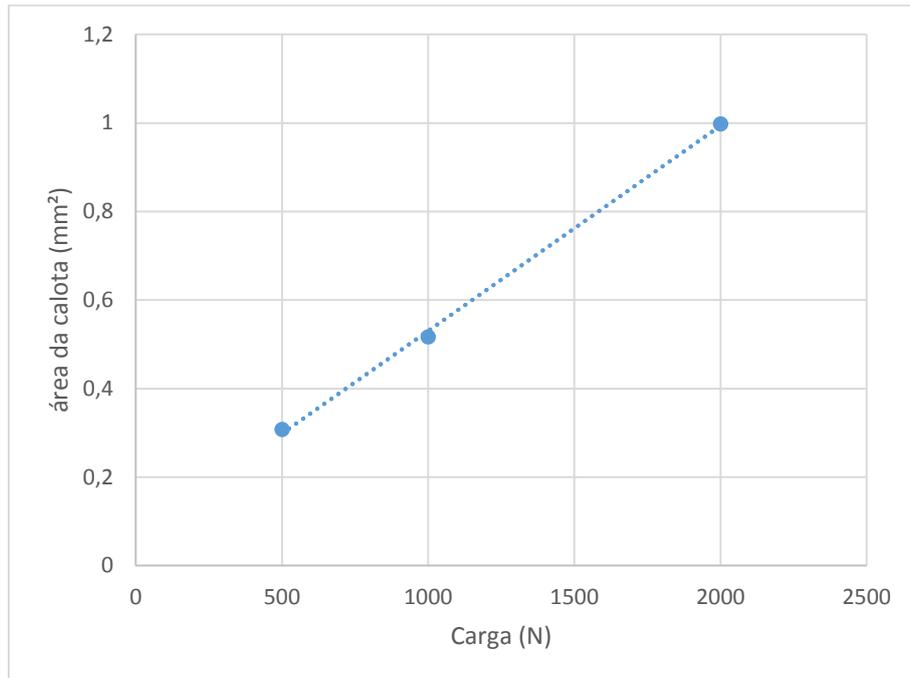


Figura 4.9 - Carga por área da calota.

Realizando uma regressão nos dados, percebe-se que o melhor ajuste é o linear e esta tendência segue a equação 4.9.

$$a_{cal} = 0,0005F_c + 0,0671 \quad (4.9)$$

em que a_{cal} é a área da calota, em milímetros quadrados e F_c é a carga aplicada. Há uma relação proporcional como mostrado no gráfico (Figura 4.9), o que já se esperava para esperava, já que o material não possui variações de propriedades em seu volume.

4.4 TESTE DE RUGOSIDADE

Para o teste preliminar, utilizou-se a mesma amostra (ver Figura 4.1) assim pode-se ter o valor para o *cutoff*. O procedimento foi feito por varredura a *laser* da superfície na face polida da peça no microscópico laser confocal com a lente de aumento 5x (Figura 4.10).



Figura 4.10 - Região da amostra analisada no microscópico com aumento de 5x.

Com auxílio do *software* obteve-se o parâmetro de rugosidade na coordenada x e na coordenada y, respectivamente, e os mesmos foram organizados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Resultados preliminares dos parâmetros de rugosidade para amostra 1.

	R_a (μm)
Direção x	1,742
Direção y	1,852
Média	$1,797 \pm 0,055$

Com esse valor do parâmetro R_a , pode determinar o comprimento medido que é, no mínimo cinco vezes o valor do *cutoff* (ver a Tabela 2.6) é de 0,8 milímetros. Assim o comprimento medido é de 4 milímetros, como a pastilha tem 25 milímetros de lado, deste modo atende o requisito imposto.

Depois do ensaio de compressão foi feito o ensaio de rugosidade, como explicitado na Figura 4.11.

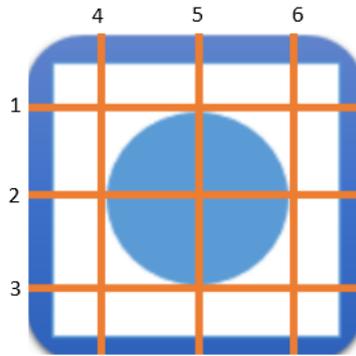


Figura 4.11 - Ensaio de rugosidade após o ensaio de compressão com as linhas identificadas.

Após o ensaio, os quatro parâmetros (R_a , R_q , R_{sk} e R_t) foram obtidos, através do programa computacional *OLS Olympus*, e organizados nas Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17.

Tabela 4.15 - Parâmetros de rugosidade após o ensaio de compressão para amostra 1 de 500 N

	Medida	R_a (μm)	R_q (μm)	R_{sk}	R_z (μm)
Horizontal	1	0,044	0,075	-1,320	0,536
	2	0,078	0,117	-0,586	0,853
	3	0,078	0,126	0,058	1,019
Vertical	4	0,079	0,138	-0,671	1,147
	5	0,129	0,222	0,235	1,734
	6	0,080	0,143	-0,603	1,155
Borda		0,069	0,118	-0,707	0,933

Tabela 4.16 - Parâmetros de rugosidade após o ensaio de compressão para amostra 2 de 1000 N.

	Medida	R_a (μm)	R_q (μm)	R_{sk}	R_z (μm)
Horizontal	1	0,064	0,095	-0,284	0,858
	2	0,064	0,095	-0,918	0,663
	3	0,092	0,134	-0,622	0,728
Vertical	4	0,064	0,089	-1,298	0,944
	5	0,116	0,159	-0,806	0,574
	6	0,079	0,123	-0,505	1,008
Borda		0,078	0,117	-0,427	0,866

Tabela 4.17 - Parâmetros de rugosidade após o ensaio de compressão para amostra 3 de 2000 N.

	Medida	R_a (μm)	R_q (μm)	R_{sk}	R_z (μm)
Horizontal	1	0,127	0,173	-0,581	1,083
	2	0,105	0,140	-0,624	0,866
	3	0,096	0,133	-0,715	0,906
Vertical	4	0,073	0,130	-1,341	1,144
	5	0,082	0,120	-0,578	0,881
	6	0,098	0,148	-0,071	1,133
Borda		0,121	0,166	-0,643	1,057

Pelos resultados pode-se observar que, quanto maior a carga, maior a rugosidade média (R_a), ou seja, menos retificada a peça fica, que pode ser explicado pelo fato de gerar atrito entre as peças durante o ensaio. Quase todos os valores de coeficiente de simetria (R_{sk}) são negativos, o que implica que há mais vales que picos, o que pode ser explicado pelo fato que durante o ensaio ocorre um achatamento dos picos.

O R_z na parte central da calota é menor do que nas bordas, resultado esperado depois do ensaio quanto mais próximo do valor de $0,4 \mu\text{m}$ mais lisa é a peça.

Os valores do desvio quadrático médio (R_q) não estão na faixa de 11% de R_a , com isso entende-se que este parâmetro não foi bem obtido uma explicação para este fenômeno pode ser que o corpo de prova foi mal armazenado em que ocasionou ranhuras na peça.

A borda possui os maiores valores do ensaio em quase todos os parâmetros, ou seja, a borda é mais rugosa do que o centro, o que é explicado pelo fato do centro da pastilha ser compactado durante o ensaio de compressão.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho e as perspectivas da continuação deste trabalho.

Com os testes preliminares pode-se aferir que o teste de microdureza Vickers não é aconselhado para este tipo de material tendo em vista que os resultados obtidos na amostra preliminar não são condizentes com a realidade mesmo sendo o teste mais utilizado em pesquisa, e o teste de dureza Brinell não analisa a superfície. Os resultados para o ensaio de dureza superficial Rockwell 30T, aferiu-se que a superficial está na faixa de 81 e 85 HR30T, mostrando que é o material mais resistente até que os próprios.

Enquanto a rugosidade, ela se comportou como esperado, ou seja, no centro da amostra em que está mais compactado a rugosidade apresentou valores menores e o coeficiente de simetria ficou negativo e a borda da calota teve valores maiores que outros pontos de análise, portanto a rugosidade segue um padrão radial crescente desde o centro até, seu ápice, na borda.

Com o teste de compressão, pode-se comparar experimentalmente os parâmetros da Teoria de Hertz, como raio de área de contato, pressão máxima e deslocamento com os valores obtidos analiticamente e teve relativamente satisfatório, com erro em torno de 15%, ou seja, o ensaio atendeu os critérios impostos pela teoria hertziana, pode ser explicado pelo fato atrito durante o ensaio e a alta dureza superficial elevada.

5.1 PERSPECTIVAS

Recomenda-se outro método para dureza superficial, tendo em vista que este ficou bem no limite superior. Mudar as condições no ensaio de compressão, como num estado adesivo, para testar outras teorias da Mecânica do Contato.

Realizar ensaio de tração afim de se obter, experimentalmente, o valor do módulo de elasticidade, como o material se apresentou muito duro, é possível que ele seja de uma classe mais elástica de 207 GPa, por exemplo. Assim refazer os cálculos para o ensaio de compressão e observar o erro experimental.

Caracterizar outras propriedades do material, como coeficiente de desgaste através de um ensaio de desgaste e o coeficiente de atrito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADACHI, Koshi. Wear Mechanisms. In: KATO, Koji. **Modern Tribology Handbook**. Sendai: Crc Press Llc, 2001. Cap. 7. p. 1-28.

ALLOY CASTING INDUSTRIES LTD.. **A352 CA6NM, A486 CA6NM Cl. A e B, A743 CA6NM**. Disponível em: <<http://alloycasting.com/what-we-pour/martensitic-stainless/ca6nm/>>. Acesso em: 26 maio 2018.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (Ed.). **Specification for Structural Joints Using ASTM A352 or A490 Bolts**. Chicago: Research Council On Structural Connections, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E92**: Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials,. [si]: Astm, 1997.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **E140-12BE1**: Standard Hrdness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. Pa: Astm, 2013. 25 p

AMESWEB. **Hertzian Contact Stress Calculator**. Disponível em: <<https://www.amesweb.info/HertzianContact/HertzianContact.aspx>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

ASTM E9-09(2018), Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org

BAPTISTA, André Luís de Brito. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. **Rem**: Revista Escola de Minas, [s.l.], v. 55, n. 2, p.103-109, abr. 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672002000200006>.

BHUSHAN, Bharat; A WILLIAMS, John; DWYER-JOYCE, Rob S. Contact Between Solid Surfaces. **Introduction to Tribology**, [s.l.], p.91-155, 14 fev. 2013. John Wiley & Sons, Ltd. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118403259.ch3>.

BURWELL JUNIOR, John T.. SURVEY OF POSSIBLE WEAR MECHANISMS. **Wear**, Nova York, v. 1, n. 1, p.119-141, 4 mar. 1957.

CALISTER JUNIOR, William D. Falhas: Fadiga. In: CALISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Utah: Ltc, 2002. p. 146-157.

CHIAVERINI, Vicente. Aços resistentes a corrosão. In: CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. Si: Associação Brasileira, 1981. Cap. 7. p. 359-398.

CONGRESSO ABM, 66., 2011, São Paulo. **Avaliação da influência da rugosidade superficial sobre o atrito no ensaio de compressão do anel**. São Paulo: Abm, 2011. 8 p.

Congresso nacional de ensaios não destrutivos, 21., 2002, Salvador. **Caracterização da rugosidade superficial através da técnica ultrassônica**. Salvador: coteq, 2002. 6 p.

Dias Figueiredo”, 2001. 100p.

FISCHER-CRIPPS, Anthony C. Contact Mechanics. In: FISCHER-CRIPPS, Anthony C. **Introduction to Contact Mechanics**. Australia: Springer, 2000. p. 1-16.

FMCQ - CONSULTORIA EM METROLOGIA E QUALIDADE. **Rugosidade**: Sorocaba: Fmcq, 2015. 26 slides, color.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaio de dureza. In: **Ensaio de materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. p. 65-98

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaio de fadiga. In: **Ensaio de materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. p. 129-153

GRAVALOS, Márcio Tadeu; MARTINS, Marcelo; DINIZ, Anselmo Eduardo and MEI, Paulo Roberto. **Influência da rugosidade na resistência à corrosão por pite em peças torneadas de aço inoxidável superaustenítico**. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2010, vol.63, n.1, pp.77-82. ISSN 0370-4467.

GREENWOOD, J; TRIPP, J H. The Elastic Contact of Rough Sphere. **Journal of Applied Mechanics**. Norwalk, p. 153-159. mar. 1967.

HENKE, Sérgio L. **Desenvolvimento de Procedimento de Soldagem de Aço Inoxidáveis Martensítico Macio tipo CA-6NM sem Tratamento Térmico Posterior**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 1998.

HERTZ, Heinrich. Über die Berührung Fester Elastischer Körper. **Für Die Reine Und Angewandte Mathematik**. Berlim, p. 156-171. jan. 1882.

ISRAEL, Charles Leonardo. **Estudo comparativo da resistência ao desgaste de impacto de ferros fundidos de alto desempenho**. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Cap. 2.

JOHNSON, K. L.; KENDALL, K.; ROBERTS, A. D.. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. **Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s.l.], v. 324, n. 1558, p.301-313, 8 set. 1971. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1971.0141>.

JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J.. Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation. **Elsevier: Wear**, Liverpool, v. 252, n. 525, p.491-500, 10 jan. 2002.

KLEIN, C.. **Minerals and Rocks: Exercises in Crystallography, Mineralogy, and Hand Specimen Petrology**. Eua: Copyright 1989 John Wiley & Sons, 2012.

LEVI, Elia e. **Practical Hardness Testing Made Simple**. Usa: Copyright (c), 2003. 25 p.

LINS, Guilherme Fernandes Caixeta; AMARAL, Thierre Lorenzo. **Projeto E Fabricação De Dispositivo Para Ensaio De Contato Entre Sólidos Com Geometria Hertziana**. 2017. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LIPPOLD, J.C., KOTECKI, D.J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*.

MAKEITFROM. **ACI-ASTM CA6NM (J91540) Cast Stainless Steel**. 2018. Disponível em: <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/ACI-ASTM-CA6NM-J91540-Cast-Stainless-Steel>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. **Rugosidade Superficial**. 2018. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/surface_roughness.html>. Acesso em: 18 nov. 2018.

MITSUBISHI MATERIALS. **Rugosidade Superficial**. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/surface_roughness.html>. Acesso em: 15 de nov 2018.

MODENESI, P.J. *Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis*. Osasco: Escola SENAI "Nadir

NASCIMENTO, Alexandre Gomes. **Avaliação da resistência à fadiga de aços CA6NM submetidos a tratamento criogênico e nitretação iônica**. 2011. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

New Jersey: Wiley-Interscience, 2005. 357p.

OLIVEIRA, Jorge Antônio Chaves de et al. **Cálculo do desvio médio aritmético Ra em função do avanço**. Recife: Grupo de Fabricação, 2000. 8 p.

OLYMPUS SCIENTIFIC SOLUTIONS AMERICAS. Roughness (2D) parameter. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/>. Acesso em: 15 nov 2018.

PADHY, Mamata Kumari; SAINI, R P. A review on silt erosion in hydro turbines. **Renewable& Sustainable Energy Reviews**. India, p. 1974-1987. 5 jan. 2007.

PIRES, Michel Sullivan Teixeira. **Estimativa de vida para fadigas sob condições de fretting usando o método das curvas de Wöhler modificadas assicuaadi com a Teoria de Distâncias Críticas**. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PUKASIEWICZ, Anderson Geraldo Marena. Aço inoxidável martensítico macio CA6NM. In: PUKASIEWICZ, Anderson Geraldo Marena. **Propagação de trincas por fadiga em juntas soldadas do aço inoxidável martensítico tipo CA6NM**. Curitiba: Ufsc, 2002. p. 4-5.

REED-HILL, Robert e. **Princípio da metalurgia física**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

RÊGO, Eduardo Martins Fontes do. **Modelagem de conexão e parafuso em ponte ferroviária para análise de fadiga**. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

RESERACH COUNCIL ON STRUCTURAL CONNECTIONS RCSC (Illinois). American Institute Of Steel Construction (Org.). **Specification for structural joints using ASTM A352 or A490 bolts**. Chicago: Reserach Council On Structural Connetions, 2004. 94 p.

RUCHERT, Cassius. **Mecânica da fratura e fadiga dos materiais**. São Carlos: Cassius Ruchert, 2014. 50 slides, color.

Santos, Matheus Tabata. **Determinação Da Emissividade E Análise Microestrutural Do Aço Inoxidável Martensítico Astm A743 Ca6nm Decorrente Da Soldagem Gmaw Em Múltiplos Passos Com Metal De Deposição Aws 410 Nimo**. 2013. 133 F. Dissertação (Mestrado) - Curso De Engenharia Mecânica, Universidade De Brasília, Brasília, 2013. Cap. 1

SEIXAS, Beatriz; CAMPOS, Mikaella. **Relatório da Petrobras revela causas de explosão em navio no ES**: Acidente aconteceu há 4 meses e deixou nove mortos e 26 feridos. Estatal foi procurada e disse que não comentaria o tema. 2015. Tv Gazeta. Disponível em: <<http://g1.globo.com/espirito-santo/noticia/2015/06/relatorio-interno-da-petrobras-revela-causas-de-explosao-em-navio-no-es.html>>. Acesso em: 26 maio 2018.

SENAI. **Apostila de Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento**. Santa Bárbara D'oeste: Senai, 2002.

SHAYANFAR, N.; HADIZADEH, M.. λ -matrix formulation applied to the Hertz contact problem with finite friction. **Computer And Mathmatics With Applications**. Terhan, p. 2478-2483. 31 maio 2012.

SOUZA, Sergio Augusto de. Ensaio de dureza. In: SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais e Metálicos**: Fundamentos Teóricos e Práticos. 5. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1982. Cap. 4. p. 71-101

TRUDEL, Alexandre; LÉVESQUE, Martin; BROCHU, Myriam. Microstructural effects on the fatigue crack growth resistance of a stainless steel CA6NM weld. **Engineering Fracture Mechanics**. Sorel-tracy, p. 60-72. 21 nov. 2013.

VIEIRA, António Manuel Rincón de Aguiar. **Aspecto termo-mecânicos na maquinação por abrasão de materiais de construção mecânica**. 2004. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.

ZHU, Xiaoyin. **Tutorial on Hertz Contact Stress**. Arizona: The Arizona Of University, 2012. Color.

ZUM GAHR, K H. Classification of Wear Processes. In: ZUM GAHR, Kh. **Tribology Series**. S.i.: Elsevier, 1987. Cap. 4. p. 80-131. (Volume 10).

ANEXO I

Código para contato de duas esferas

49

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%E Teórico%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

E_1= 200000000000; %Pa
E_2= 200000000000; %Pa
nu_1 = 0.28;
nu_2 = 0.28;
R_1 = 5/1000; %m

%Módulo de contato
E = ((1-(nu_1*nu_1))/E_1)+((1-(nu_2*nu_2))/E_2);
E_eq = 1/E; %Pa

%Raio de curvatura
R_eq = R_1; %R_2 é infinito, caso da placa
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Carga de 500N%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Raio da área de contato
F_c_1 = 500;
a_teo_1 = 1000*((3*F_c_1*R_eq)/(4*E_eq))^(1/3); %mm

%Pressão máxima 500N
P_max_teo_1 = (3*F_c_1)/(2*3.14*a_teo_1*a_teo_1);

%deslocamento 500N
delta_teo_1 = (a_teo_1*a_teo_1)/(1000*R_eq); %mm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Carga de 1000N%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
F_c_2 = 1000;
a_teo_2 = 1000*((3*F_c_2*R_eq)/(4*E_eq))^(1/3); %mm

%Pressão máxima 1000N
P_max_teo_2 = (3*F_c_2)/(2*3.14*a_teo_2*a_teo_2);

% deslocamento 1000N
delta_teo_2 = (a_teo_2*a_teo_2)/(1000*R_eq); %mm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Carga de 2000N%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
F_c_3 = 2000;
a_teo_3 = 1000*((3*F_c_3*R_eq)/(4*E_eq))^(1/3); %mm

%Pressão máxima 2000N
P_max_teo_3 = (3*F_c_3)/(2*3.14*a_teo_3*a_teo_3);

% deslocamento 2000N
delta_teo_3 = (a_teo_3*a_teo_3)/(1000*R_eq); %m

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Experimental%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Carga de 500N%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%deslocamento relativo de carga 500 N
s_1 = abs(0.9953-0.9602);
delta_exp_1 = s_1/2;

%raio da área de contato experimental
a_exp_1 = sqrt(delta_exp_1*1000*R_1); %mm

%Pressão máxima experimental
P_max_exp_1 = (3*F_c_1)/(2*3.14*a_exp_1*a_exp_1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Carga de 1000N%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%deslocamento experimental de carga 500 N
s_2 = abs(0.9901-0.9573);
delta_exp_2 = s_2/2;

%raio da área de contato experimental
a_exp_2 = sqrt(delta_exp_2*1000*R_1); %mm

%Pressão máxima experimental
P_max_exp_2 = (3*F_c_2)/(2*3.14*a_exp_2*a_exp_2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Carga de 1000N%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%deslocamento experimental de carga 500 N
s_3 = abs(1.045-0.967);
delta_exp_3 = s_3/2;

%raio da área de contato experimental
a_exp_3 = sqrt(delta_exp_3*1000*R_1); %mm

%Pressão máxima experimental
P_max_exp_3 = (3*F_c_3)/(2*3.14*a_exp_3*a_exp_3);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Erro experimental%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

erro_1 = 100*abs(a_teo_1-a_exp_1)/a_teo_1;

erro_2 = 100*abs(a_teo_2-a_exp_2)/a_teo_2;

erro_3 = 100*abs(a_teo_3-a_exp_3)/a_teo_3;

```