

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
LUCAS DE OLIVEIRA SOARES**

**COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS TESTES DE DUREZA
APRESENTADOS PELAS ESCALAS ROCKWELL B E BRINELL EM ALUMÍNIO
AERONÁUTICO**

Varginha

2022

LUCAS DE OLIVEIRA SOARES

**COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS TESTES DE DUREZA
APRESENTADOS PELAS ESCALAS ROCKWELL B E BRINELL EM ALUMÍNIO
AERONÁUTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, sob. orientação da Prof. Dra. Deborah Reis Alvarenga Romano e coorientação do Prof. Me. Fabiano Farias de Oliveira

**Varginha
2022**

LUCAS DE OLIVEIRA SOARES

**COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS TESTES DE DUREZA
APRESENTADOS PELAS ESCALAS ROCKWELL B E BRINELL EM ALUMÍNIO
AERONÁUTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, sob. orientação da Prof. Dra. Deborah Reis Alvarenga Romano e coorientação do Prof. Me. Fabiano Farias de Oliveira

Aprovado em / /

Prof. Dra. Deborah Reis Alvarenga Romano

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico aos meus pais, pois graças a eles hoje posso finalizar o meu curso. Ao meu orientador, Prof. Dra. Deborah pela orientação e ao meu coorientador Prof. Fabiano.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio em momentos difíceis. A todos os professores, em especial aqueles que se dedicaram em contribuir a esse trabalho.

“Não se esforce apenas para ser melhor que seus contemporâneos. Tente ser melhor que você mesmo.”
Willian Faulkner

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre a comparação dos ensaios realizados nas escalas Rockwell B e Brinell, visando demonstrar a variância que um equipamento com baixa resolução pode causar no processo de medição da dureza. A dureza é uma importante propriedade física do material. Pode ser definida como a resistência de um sólido à penetração de um ponto, e pode ser pensada como uma indicação indireta da resistência de um material à desgaste. O trabalho será realizado a partir de uma referência bibliográfica seguida de testes laboratoriais focados na comparação de dois medidores. O trabalho busca descrever um método seguido de uma comparação usando modelos estatísticos usados na indústria para testar a estabilidade das medições. As informações necessárias para realizar o estudo foram obtidas a partir de pesquisas de normas de testes de dureza e trabalhos acadêmicos publicados, já os valores de dureza foram obtidos a partir de um medidor a laser localizado no centro universitário do sul de minas e outro medidor localizado em uma empresa do ramo automobilístico de Varginha-MG. A partir desse trabalho foi possível concluir que o objetivo foi alcançado de maneira bastante satisfatória, pois foi demonstrado a partir de análises estatísticas que a resolução obtida pelo equipamento no momento do ensaio afetou de forma significativa a estabilidade dos testes, gerando resultados aquém do exigido em padrões de qualidade de processos.

Palavras-chave: Dureza; Material; Medições

ABSTRACT

The objective of this work is to present a study on the comparison of tests performed on the Rockwell B and Brinell scales, aiming to demonstrate the variance that a low resolution equipment can cause in the hardness measurement process. Hardness is an important physical property of the material. It can be defined as the resistance of a solid to penetration from a point, and can be thought of as an indirect indication of a material's resistance to wear. The work will be carried out from a bibliographic reference followed by laboratory tests focused on the comparison of two meters. The work seeks to describe a method followed by a comparison using statistical models used in the industry to test the stability of measurements. The information necessary to carry out the study was obtained from research on hardness testing standards and published academic works, whereas the hardness values were obtained from a laser meter located at the university center of southern Minas and another meter located in an automobile company in Varginha-MG. From this work, it was possible to conclude that the objective was achieved in a very satisfactory way, as it was demonstrated from statistical analyzes that the resolution obtained by the equipment at the time of the test significantly affected the stability of the tests, generating results below the required in process quality standards.

Keywords: *Hardness; Material; measurements*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de alumínio nos últimos 20 anos.....	17
Figura 2 – Corpos de prova para ensaio de tração.....	20
Figura 3 – Fluxograma de atividade.....	24
Figura 4 – Máquina fresadora.....	25
Figura 5 – Lixa nº 600.....	26
Figura 6 – Suporte para lixamento.....	26
Figura 7 – Antes e depois do lixamento.....	27
Figura 8 – Demarcação dos pontos de teste.....	29
Figura 9 – Demarcação dos pontos de teste na área A.....	30
Figura 10 – Demarcação dos pontos no durômetro.....	31
Figura 11 – Demonstrativo do material no durômetro.....	31
Figura 12 – Leitura dos resultados.....	32
Figura 13 – Lupa para medições.....	33
Figura 14 – Máquina medição laser.....	34
Figura 15 – Realização da medição.....	35
Figura 16 – Resultados da medição.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação dos ensaios na superfície A.....	39
Gráfico 2 – Comparação dos ensaios na superfície B.....	40
Gráfico 3 – Capacidade superfície A lupa Unis.....	42
Gráfico 4 – Capacidade superfície A Medidor Laser.....	43
Gráfico 5 – Capacidade superfície B lupa Unis.....	44
Gráfico 6 – Capacidade superfície B Medidor laser.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultados da primeira medição.....	37
Quadro 2 – Resultados da segunda medição.....	38
Quadro 3 – Testes em Rockwell B.....	38
Quadro 4 – Resultados superfície A.....	40
Quadro 5 – Resultados superfície B.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Alumínio.....	14
2.2 Tipos de ligas de alumínio.....	15
2.3 Aplicações.....	16
2.4 Dureza.....	17
2.5 Teste de dureza.....	18
2.6 Ensaio de dureza Rockwell.....	19
2.7 Ensaio de dureza Brinell.....	19
2.8 Normas.....	21
2.8.1 Normas de teste de dureza Rockwell.....	21
2.8.2 Normas de teste de dureza Brinell.....	22
3 METODOLOGIA.....	24
3.1 Retífica do material.....	24
3.2 Escolha das superfícies.....	25
3.3 Polimento das superfícies.....	25
3.4 Definição das distâncias entre os testes.....	27
3.5 Testes preliminares.....	27
3.6 Demarcação das distâncias entre os testes.....	29
3.7 Realização dos ensaios em Rockwell.....	32
3.8 Realização dos ensaios em Brinell.....	32
3.8.1 Primeira medição em Brinell.....	33
3.8.2 Segunda medição em Brinell.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	47
ANEXO A.....	49
ANEXO B.....	50

1 INTRODUÇÃO

A dureza é uma propriedade de um material que mede sua resistência à deformação plástica permanente, na qual podemos relacionar resistência à penetração, flexão, abrasão ou corte. Testes de dureza são importantes para verificar a resistência de componentes a diversos esforços, como tração, compressão, flexão e cisalhamento. A dureza do material implica diretamente na resistência nesses materiais.

No setor industrial os testes de durezas são para análises de confiabilidade, durabilidade e resistência. Dentro de diversos setores e empresas são usadas padronizações de acordo com a necessidade de cada cliente e do produto utilizado. Para isso existem diversas escalas dentre os testes de dureza disponíveis no mercado. Um método muito usado para atender esses padrões, é a conversão de unidades de dureza feitos em uma determinada unidade para outra. Para isso existem tabelas e formulas disponíveis em bibliografias para realizar essa conversão. O trabalho realizado nesse artigo propõe uma comparação entre os testes realizados em Rockwell B, em maquinário projetado para este teste e os testes realizado em Brinell convertidos em Rockwell B, visando demonstrar a variação causada na conversão, as razões dessa diferença, os problemas que podem causar desta variação, tanto produtivo como os riscos gerados e as possíveis soluções para solucionar esse problema.

Para a realização dos ensaios de dureza, será usada uma chapa de Alumínio Aeronáutico, usando uma máquina utilizada para testes de dureza, especificamente Rockwell B e Brinell, localizadas no Centro Universitário do Sul de Minas.

O objetivo inicial é usar chapas do metal dúctil para realizar os testes e compará-los realizando cálculos de variação, dispersão, desvio padrão, considerando os testes Rockwell B e Brinell, para definir qual é o mais adequado para produzir resultados mais exatos em relação a característica específica de dureza, com o objetivo de criar um comparativo estatístico do Alumínio Aeronáutico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os temas a seguir tratarão de temas que embasarão o estudo de caso que acontecerá ao decorrer do trabalho.

2.1 Alumínio

Segundo Smith (1997), o alumínio é atualmente o segundo metal mais consumido na engenharia, depois do ferro e do aço. Tal consumo é explicado pelas propriedades exibidas por este material, tendo uma densidade específica baixa e, em certas ligas, se comparar a resistência mecânica do aço estrutural.

O alumínio apresenta vantagens significativas em determinadas aplicações devido à sua boa condutividade térmica e elétrica, alta resistência à corrosão e aparência estética agradável (DE LIMA, 2006).

Segundo Braga (2011) O alumínio é um dos metais mais abundantes na crosta terrestre, e suas aquisições comercialmente viáveis foram desenvolvidas independentemente em 1886 por Herult na França e Hall nos Estados Unidos. O alumínio atraiu grande interesse desde então, e seus usos continuaram a se expandir devido à sua baixa densidade e ampla gama de propriedades físicas, mecânicas, elétricas e térmicas.

Os primeiros usos comerciais do alumínio foram para objetos nobres, como molduras de espelhos, números de casas e bandejas. Utensílios de cozinha, como panelas e frigideiras, também foram um importante mercado inicial. Com o tempo, o alumínio se diversificou em suas aplicações a ponto de praticamente todos os aspectos da vida moderna serem afetados direta ou indiretamente pelo seu uso (BRAGA, 2011).

Hoje, os maiores produtores mundiais de alumínio são os Estados Unidos e o Canadá. Entretanto, nenhum deles possui jazidas de bauxita em seu território, criando uma grande dependência da importação do minério. O Brasil possui a terceira maior reserva mineral do mundo, localizada na região amazônica, depois da Austrália e Guiné (BRAGA, 2011).

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (2022), apesar do cenário difícil causado pela pandemia do novo coronavírus, o balanço da indústria do alumínio segue positivo em 2021, sugerindo que o ciclo de crescimento continuará a ser retomado. Estima-se que o consumo interno de produtos industrializados aumentou 12,2% em relação a 2020, atingindo uma produção recorde de 1.597,5 mil toneladas, superior ao pico registrado em 2013 - 1.513 mil toneladas.

Todos os outros setores obtiveram um crescimento de dois dígitos em relação ao mesmo período de 2020. O destaque é a extrusão e laminação, representando 71% do mercado total e alcançando um aumento de 28,7 – 20,4%, respectivamente (ABAL, 2022).

2.2 Tipos de ligas de alumínio

Segundo Capelari (2006) As ligas de alumínio, de acordo com sua composição, podem ser divididas em duas categorias, cada uma com seu próprio sistema de classificação: composição de fundição e composição de usinagem. As preparações destinadas à usinagem são classificadas em séries de quatro dígitos de acordo com o principal elemento de liga adicionado.

O significado dos dígitos difere entre a série 1xxx e os outros números. Na sequência 1xxx, o segundo dígito, se zero, indica que as impurezas estão presentes naturalmente no processo de fabricação. Se for diferente de zero, indica que há um controle especial sobre a concentração de uma certa impureza. O terceiro e quarto dígitos representam a porcentagem do material além dos 99% existentes. No caso do alumínio 105, o percentual de alumínio presente seria de 99,5%, sendo o restante impurezas naturais do processo (CAPELARI, 2006).

Para as séries 2xxx a 9xxx, o primeiro dígito indica a série à qual a liga pertence e, portanto, é o elemento principal do complemento. O segundo dígito indicará se a composição da liga é a mesma da liga originalmente desenvolvida (se zero), ou se a liga original sofreu alteração em sua composição química (dígitos 1 a 9). Apenas o terceiro e quarto dígitos distinguem as ligas da mesma série (CAPELARI, 2006).

Destas séries, ainda é possível fazer uma pequena parte referente ao mecanismo de endurecimento pelo qual as ligas reagem e favorecem o aumento da dureza e resistência mecânica. As ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx são classificadas como tratáveis termicamente, enquanto as séries 3xxx, 4xxx e 5xxx são consideradas endurecíveis. As características gerais de cada série de ligas de alumínio são descritas a seguir, bem como suas áreas de aplicação mais frequentes (CAPELARI, 2006).

Série 1xxx: Com pureza igual ou superior a 99%, utilizada principalmente na área elétrica e química. Possui excelente resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, alta ductilidade e baixa resistência mecânica. Eles são moderadamente relativos aos processos de endurecimento por estresse devido à sua alta pureza (CAPELARI, 2006).

Série 2xxx: O cobre é o elemento de liga primário e as propriedades mecânicas desta série podem ser superiores às de alguns aços de baixo carbono. Eles são amplamente utilizados

em aplicações estruturais. Possui baixa resistência à usinagem, baixa soldabilidade e uma resistência baixa à corrosão. As propriedades de corrosão são frequentemente melhoradas pelo revestimento de alumínio de alta pureza ou ligas da série 6xxx (Cladamento ou Alclad) (CAPELARI, 2006).

Série 3xxx: As ligas desta série possuem resistência mecânica moderada, encontradas em aplicações nos mais diversos segmentos, desde eletrodomésticos, trocadores de calor e placas de trânsito até latas de bebidas. O principal elemento de liga é o manganês, embora tenha uma solubilidade máxima de apenas 1,5%. A maior resistência mecânica é devido ao trabalho mecânico (CAPELARI, 2006).

Série 4xxx: O principal elemento de liga desta série é o silício, com teor de até 12%. Sua função é diminuir os pontos de fusão dessas ligas sem enfraquecê-las. Uma vez que fundem a temperaturas mais baixas do que outros graus, essas ligas são usadas principalmente como fios de solda e ligas de solda (CAPELARI, 2006).

Série 5xxx: O magnésio, principal elemento de liga desta série, combina-se com o manganês para formar ligas de resistência mecânica média-alta. Com boa soldabilidade e excelente resistência à corrosão (especialmente em ambientes salinos), esta linha de produtos é aplicada em diversos campos. A gama de produtos se estende desde navios e embarcações, tanques de armazenamento e caixas de congelamento até estruturas automotivas (CAPELARI, 2006).

Série 6xxx: nesta série, o magnésio e o silício são adicionados em proporções suficientes para formar silicato de magnésio (Mg_2Si). As ligas desta série têm alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade e são fáceis de trabalhar. Eles são usados parafusos arquitetônicos, quadros de bicicletas e também estruturas soldadas (CAPELARI, 2006).

Série 7xxx: Em 1-8%, o zinco é o principal elemento de liga, embora magnésio, cobre, cromo e zircônio também sejam possíveis em quantidades menores. O zinco, juntamente com o magnésio, confere às ligas desta série uma resistência mecânica muito elevada, o que as torna amplamente utilizadas em aplicações estruturais, principalmente aeronáuticas (CAPELARI, 2006).

2.3 Aplicações

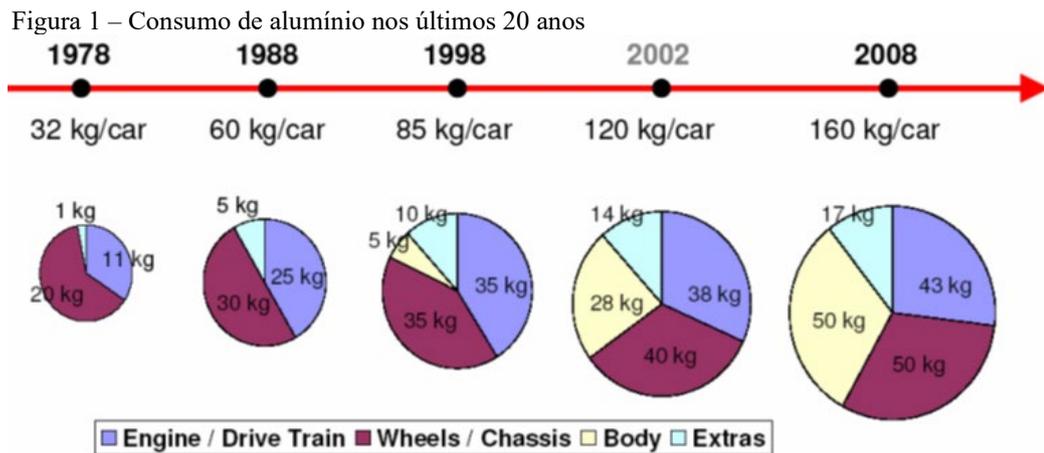
O alumínio aeronáutico vem sendo muito estudado para aplicações industriais devido a suas características como baixa densidade e alta resistência mecânica.

Segundo Braga (2011) Na indústria aeroespacial, a utilização do alumínio começou com o advento do alemão DURALUMIN, com a série 2xxx, e a busca por ligas de maior resistência, menor densidade, permitindo o projeto de estruturas mais leves e com maior tolerância a danos.

Atualmente, as ligas de alumínio mais utilizadas em aeronaves comerciais são as ligas Al-Cu, Al-Li e Al-Zn nas séries 2xxx, 7xxx e 8xxx. Destas, as ligas 7050 e 7475 são muito usadas em revestimentos da fuselagem, painéis e armações da fuselagem, asas inferiores e revestimentos da cauda. Na indústria aeronáutica, cerca de 70% das aeronaves são feitas de alumínio (BRAGA, 2011).

Outro exemplo de aplicação é na indústria automotiva, os componentes de alumínio representam em média 8,6% do peso total de um veículo (BRAGA, 2011).

Segundo De Lima (2006), ao longo dos últimos 20 anos o consumo de alumínio mais que triplicou em aplicações automotivas



Fonte: De Lima (2006)

2.4 Dureza

A palavra dureza, usado na indústria, é definido como a capacidade de um material resistir à deformação quando exposto a penetração, a qual é aplicada uma carga (BERTOL, 2009).

A dureza superficial é uma importante propriedade física do material. Pode ser definida como a resistência de um sólido à penetração de um ponto, e pode ser pensada como uma indicação indireta da resistência de um material à desgaste, além da sua resistência mecânica (BERTOLDI, 2014).

Dureza é uma propriedade mecânica de um material que está relacionada com a facilidade ou dificuldade de deformação plástica local, ou seja, a capacidade do material de resistir a pequenos amassados ou arranhões (CALLISTER; WILLIAM, 2002).

Segundo Bertoldi (2014), a dureza é uma propriedade para a qual são utilizados procedimentos de medição específicos e é definida como a resistência à deformação permanente de uma superfície sujeita à penetração. Os ensaios Brinell e Rockwell são amplamente utilizados como medidas de dureza de materiais.

2.5 Teste de dureza

Bertoldi (2014) menciona que o ensaio de dureza é um dos ensaios mecânicos mais praticados, porque apresenta mais vantagens os demais. Entre esses motivos estão sua simplicidade e custo, uma vez que as amostras não requerem preparação complexa (no máximo lixamento e polimento) e o equipamento é relativamente barato. Além disso, o ensaio é considerado não destrutivo, pois não há deformação ou quebra do corpo de prova. Por fim, aqui está um teste que pode gerar outras informações como módulo de elasticidade, limite de resistência, tensão residual, entre outros.

Segundo Anusavice (2005) a dureza Brinell e Rockwell, também conhecida como dureza macroscópica, utiliza grandes regiões de um determinado material para análise de dureza. Por essas razões, as durezas Brinell e Rockwell são comumente usadas para analisar a dureza de materiais na indústria. Alguns dos testes mais usados para medir a dureza de um corpo de prova são: Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop.

Dureza é uma propriedade mecânica que se baseia na resistência que um material, ao ser comprimido por outro ou por marcadores padronizados, risca ou forma uma marca permanente. Os métodos e testes mais comumente aplicados em engenharia utilizam entalhes em formato padrão e são prensados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga, causando variação primeiramente elástica e depois plástica (GARCIA, 2012).

O teste de dureza envolve a aplicação de uma carga na superfície de um material usando uma endentação padronizada, criando um entalhe ou entalhe na superfície. A medição da dureza do material ou da dureza da superfície é dada de acordo com as características da impressão e a carga aplicada em cada tipo de ensaio realizado. Este teste é amplamente utilizado em componentes mecânicos e elétricos, tratamento de superfícies, indústrias de vidro e laminação, devido à vantagem de fornecer dados quantitativos sobre propriedades de resistência e deformação permanente das peças fabricadas (GARCIA, 2012).

2.6 Ensaio de dureza Rockwell

No início do século XX, muitos avanços foram feitos na área de determinação de dureza. Em 1922, Rockwell desenvolveu um método de teste de dureza usando um sistema de pré-carga. Este método apresenta algumas vantagens em relação ao Brinell, por que possibilita a medição da dureza de metais mais dúcteis até os mais duros. O teste Rockwell, batizado em homenagem ao seu criador, é hoje o método mais utilizado na indústria, devido à sua agilidade e facilidade de execução, detectando pequenas diferenças de dureza e tamanho de impressão pequeno com facilidade (Penteado, 2003 apud Bertoldi, 2014).

O teste Rockwell baseia-se na medida da profundidade da indentação menos a recuperação elástica devido à maior carga e a profundidade causada pela aplicação da menor carga. Aproveitar uma carga inicial mais baixa, seguida de uma carga principal mais alta, aumenta a precisão do teste. O método Rockwell é subdividido em dois grupos: Normal e Superficial, se diferenciando no valor da carga utilizada. A dureza Rockwell normal aplica uma carga de até 150 Kgf, enquanto a dureza Rockwell superficial aplica-se até 5 Kgf (Mora, 2010 apud Bertoldi 2014).

Em particular, o teste Rockwell mede a profundidade adicional alcançada por uma esfera de metal duro, ou broca de diamante, quando pressionada no material por uma carga alta (topo), além da profundidade devido a uma carga mais baixa (carga inferior). Números de dureza Rockwell altos representam aços endurecidos e números baixos representam aços mais macios (GALVINFOCENTER, 2012).

O teste de dureza Rockwell é o teste de dureza mais amplamente utilizado, não apenas para aço, mas também para muitos outros metais. Este é um teste muito rápido, baseado na medição da profundidade de penetração de um recuo, leva em média cerca de 7 segundos e pode ser usado em chapas de metal tão finas quanto 0,15 mm (GALVINFOCENTER, 2012).

2.7 Ensaio de dureza Brinell

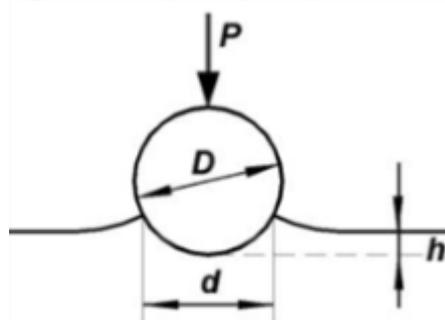
Este teste foi proposto pela primeira vez em 1900 por James A. Brinell e foi o primeiro teste de penetração do a ser padronizado e reconhecido na indústria. Consiste em comprimir uma esfera metálica simulada na superfície do material sob teste, criando uma capa esférica (GARCIA, 2012).

O ensaio de dureza Brinell consiste na compressão gradual de uma esfera de aço temperado de diâmetro conhecido, sob uma superfície de metal limpa, polida e plana, mediante

a aplicação de uma força especificada por um tempo determinado por um tempo especificado, formando uma deformação esférica permanente na superfície metálica. A região é então medida com uma lupa graduada e o valor resultante é comparado com a tabela para determinar a dureza do material na escala Brinell (DE LIMA, 2006).

Segundo Trevisan (2007), o ensaio de dureza Brinell consiste na compressão lenta de uma esfera de aço temperado, de diâmetro D , sobre uma superfície metálica plana, polida e limpa, por uma carga F , no tempo t , produz uma deformação esférica de diâmetro d , como mostrado na Fig. 1. A dureza Brinell é indicada pelas letras HB. Esta apresentação vem do Inglês Hardness Brinell.

Figura 2 – Corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Trevisan (2007)

Segundo Trevisan (2007) a dureza Brinell (HB) é a relação entre a carga aplicada (F) e a área da calota esférica impressa no material ensaiado (A_c) representado abaixo conforme equação 1:

$$HB = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Onde:

HB = Dureza dada em Brinell;

F = Carga aplicada sobre a esfera em kgf;

A_c = Área da calota esférica em mm².

A área da calota esférica é dada pela equação 2:

$$A_c = \pi \cdot D \cdot p \quad (2)$$

Onde:

D = Diâmetro da esfera em mm;

p = Profundidade da calota.

Substituindo a equação 1 na equação 2, tem-se:

$$HB = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot p} \quad (3)$$

Trevisan (2007) define que devido à medição da profundidade (p), que é um valor muito pequeno, utiliza-se uma relação matemática entre a profundidade (p) e o diâmetro (d) para chegar à equação matemática que permite o cálculo da dureza HB, representada a seguir na equação 4:

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

2.8 Normas

Dentro da Engenharia, nos mais diversos campos de atuação, existem normas que regem como os profissionais da área devem desenvolver seus trabalhos, tanto na área técnica, quanto na área de segurança. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui 3 normas para cada um dos testes de dureza que serão usados neste trabalho

2.8.1 Norma de teste de dureza Rockwell

Para os testes de dureza Rockwell, tem-se as seguintes:

NBR ISO 6508-1 DE 06/2019; Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell

Parte 1: método de ensaio

Esta norma especifica o método de teste para dureza Rockwell normal e dureza superficial Rockwell para escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, 15N, 30N, 5N, 15T, 30T e 5T para materiais metálicos, e aplicável para durômetros fixos e móveis. (ABNT)

NBR ISO 6508-2 DE 06/2019; Materiais metálicos Ensaio de dureza Rockwell

Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio e penetradores

Esta parte da norma especifica dois métodos de verificação de máquina de teste (diretos e indiretos) para a determinação da dureza Rockwell de acordo com a ISO 65081-1:2019, bem como o método de verificação de penetradores. (ABNT)

NBR ISO 6508-3 DE 06/2019; Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell

Parte 3: Calibração de blocos de referência

Esta Parte da norma especifica o método para a calibração de blocos de referência para serem utilizados na verificação indireta e diária de máquinas de ensaio de dureza Rockwell, como especificada na NBR ISO 6508-2:2019. (ABNT)

2.8.2 Normas de teste de dureza Brinell

NBR ISO 6506-1 DE 01/2019; Materiais metálicos Ensaio de dureza Brinell.

Parte 1: Método de Ensaio

Esta parte da norma especifica o método de teste de dureza Brinell para materiais metálicos. Aplica-se a testadores de dureza fixos e móveis

NBR ISO 6506-2 DE 01/2019; Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell

Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio

Este Documento especifica os métodos de verificação direta e indireta das máquinas de ensaios utilizadas para a determinação da dureza Brinell de acordo com a ABNT NBR ISO 6506-1 especificando também quando essas verificações devem ser feitas.

NBR ISO 6506-3 DE 01/2019; Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell.

Parte 3: Calibração de blocos de referência

Esta parte da norma especifica um método para a calibração de blocos de referência para serem utilizados na verificação indireta de máquinas de teste de dureza Brinell, conforme descrito na NBR ISO 6506-2.

NBR ISO 6506-4 DE 01/2019; Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell.

Parte 4: Tabela de valores de dureza

Esta norma fornece uma tabela de valores de dureza a serem utilizados para testes em superfícies planas.

3 METODOLOGIA

Dando início aos trabalhos, primeiramente foi definido as etapas corretas e necessárias a padronização dos ensaios, para que os resultados finais ficassem o mais confiáveis. Dito isso, foram criadas etapas de preparação do material que estão descritas no fluxograma abaixo:

Figura 3 – Fluxograma de atividade



Fonte: O autor

3.1 Retífica do material

Os ensaios de dureza precisam ser feitos em superfícies lisas, polidas e sem inclinação, para que as imperfeições não causem distorções nos valores do ensaio. Para isso foi feito a retífica no corpo de prova (barra de alumínio), em uma fresadora, conforme figura abaixo:

Figura 4 – Máquina fresadora



Fonte: O autor

3.2 Escolha das superfícies

Após a retificação, apenas duas superfícies (as de melhores acabamentos) foram escolhidas, denominadas de lado A e lado B, onde foram devidamente marcadas para dar início ao polimento das superfícies.

3.3 Polimento das superfícies

Como dito anteriormente, para que os ensaios de dureza apontem os resultados mais preciso possíveis, as superfícies onde serão realizados os testes necessitam estar o mais plana e sem imperfeições possíveis. Baseado nisso, após a seleção das faces onde serão realizados os testes, foi dado início então nos polimentos das faces. Para realizar essa tarefa, foi usado uma lixa d'água nº 600. O número da lixa é dado pelo tamanho e quantidade de protuberância na lixa, quanto maior o número, maior a quantidade e, conseqüentemente, menor a quantidade de material removido, dando um acabamento melhor ao material.

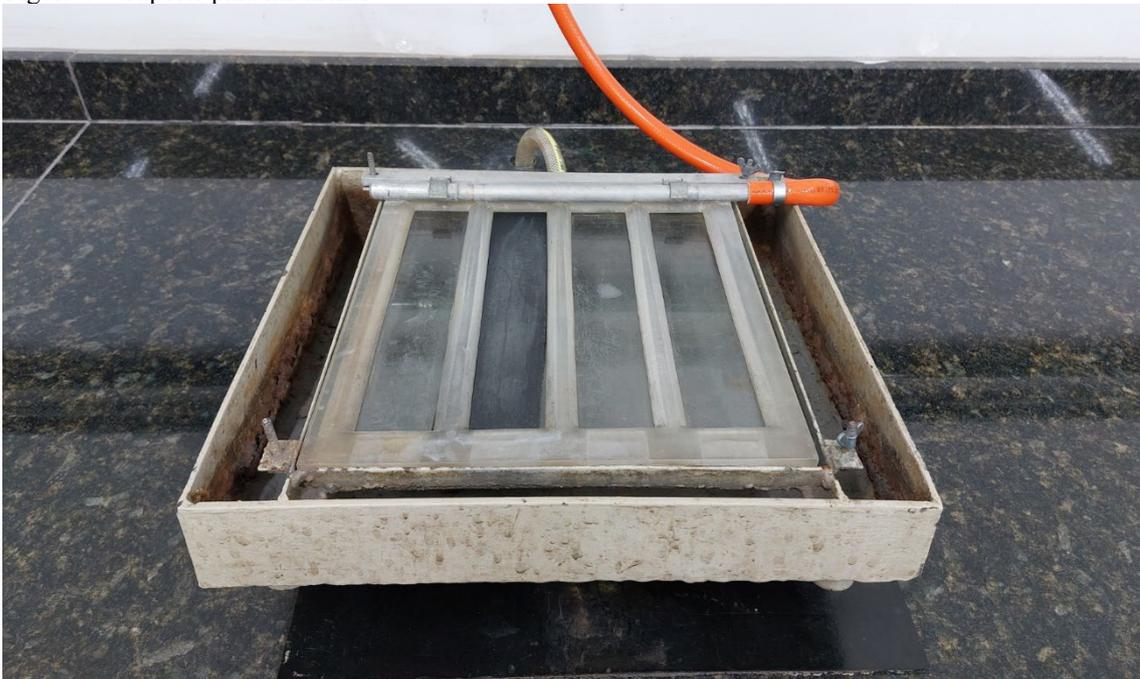
Figura 5 – Lixa nº 600



Fonte: O autor

Foi utilizado um suporte para saída de água, possibilitando um lixamento contínuo da superfície do material.

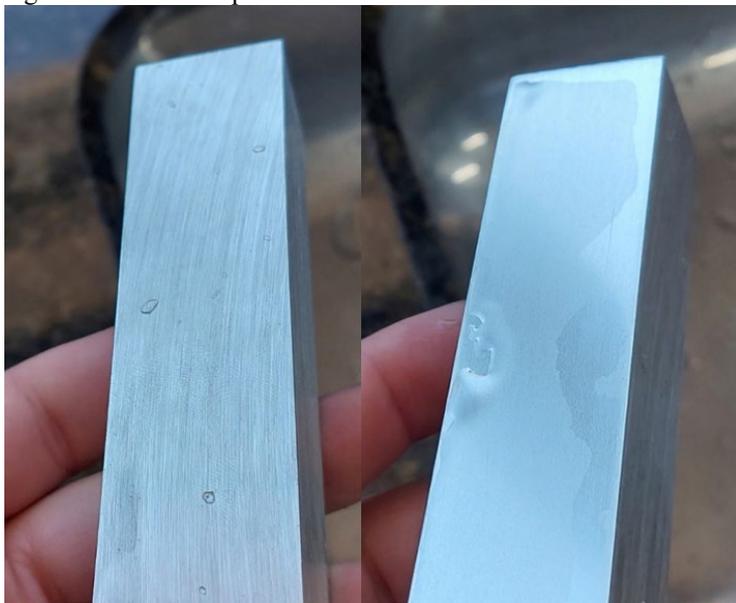
Figura 6 – Suporte para lixamento



Fonte: O autor

Antes e depois do lixamento da superfície:

Figura 7 – Antes e depois do lixamento



Fonte: O autor

3.4 Definição das distâncias entre os testes

Conforme propósito inicial do trabalho foram realizados dos tipos de testes de dureza distintos. O primeiro teste de dureza realizado foi o ensaio Rockwell B, onde a carga aplicada na superfície da peça foi de 100kg e com penetrador de aço esférico de 1/16” (aço com liga de tungstênio).

O segundo teste de dureza realizado foi Brinell, com carga de 187,5 kg, penetrador esférico de aço com o diâmetro de 5mm.

3.5 Testes preliminares

Em testes preliminares, o diâmetro médio da impressão causada pelos testes de dureza Brinell foi de 1,5mm. Diâmetro esse que será usado para as demais parametrizações dos testes.

Conforme a norma NBR ISO 6508-1, para teste de dureza Rockwell, tem de se respeitar distâncias específicas em relação a aresta do material, uma distância específica entre uma impressão e outra e também deve-se observar uma espessura mínima que o corpo de prova necessita ter para realização dos testes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Para o teste de dureza Rockwell, a espessura mínima do material deve ser 3,6mm, de mostrada na tabela da figura B.2 do anexo B da norma referenciada. Dito isso, o corpo de prova que será utilizado nestes testes atende perfeitamente a exigência da norma.

Ainda conforme a norma acima, a distância entre os centros de duas calotas próximas nos testes Rockwell, deve ser de pelo menos três vezes o diâmetro da impressão, resultando em uma distância mínima de 4,5mm entre uma impressão e outra.

Ademais, a distância entre o centro de uma impressão, até a borda do corpo de prova, deve ser pelo menos duas vezes e meia o diâmetro da impressão, resultando em uma distância mínima de 3,75mm do centro da impressão até a borda da peça.

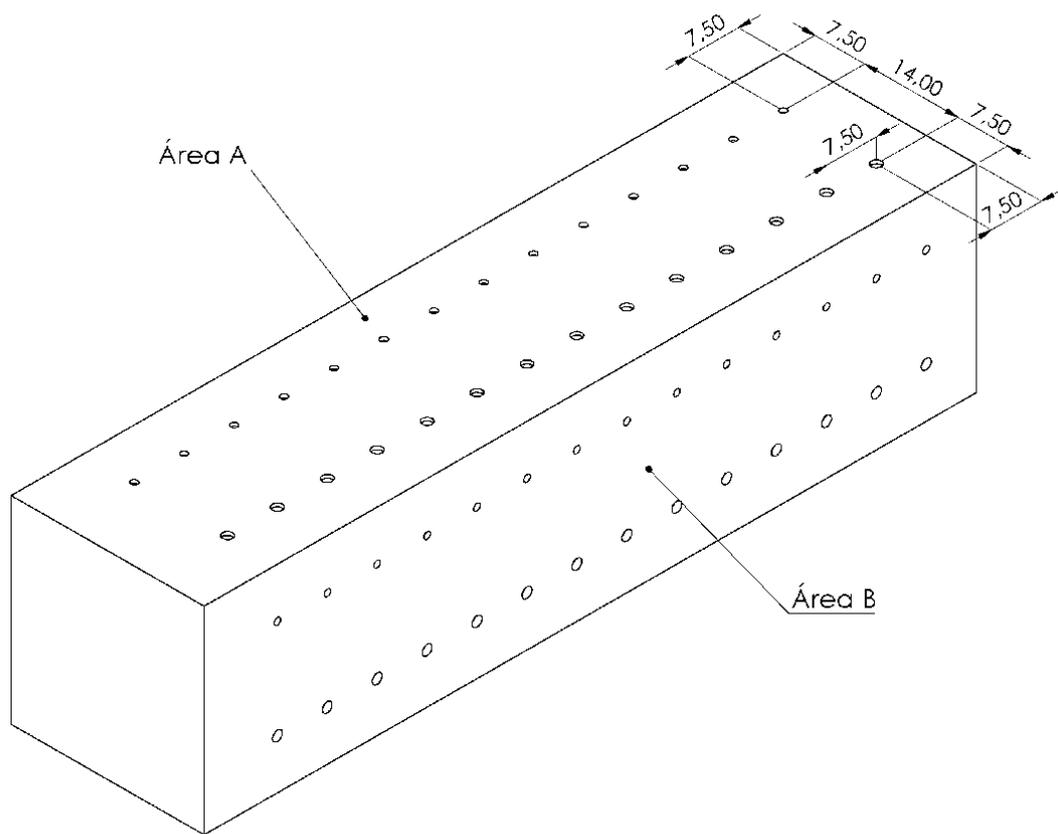
Já para os testes de dureza Brinell, conforme a norma NBR ISO 6506-1 a espessura mínima do material é de 0,92 mm, tabelada conforme o diâmetro do penetrador que será utilizado nos testes, que será de 5 mm, mostrada na tabela da figura B.1 do anexo B da norma referenciada. Dito isso, o corpo de prova que será utilizado nestes testes atende perfeitamente a exigência da norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Além disso, a distância entre os centros de duas impressões exigida pela norma deve ser de no mínimo 3 vezes o diâmetro da impressão. Neste caso, a distância mínima entre eles será de 4,5 mm.

Por final, a distância entre o centro de uma impressão até a borda do corpo de prova deve ser no mínimo duas vezes e meia o diâmetro da impressão, resultando em uma distância mínima de 3,75 mm.

Dado os parâmetros estabelecidos pelas normas de cada um dos testes, foi definida uma quantidade 14 pontos de ensaios de cada tipo de teste que serão realizados em cada uma das 2 áreas do corpo de prova, representados em milímetros conforme figura abaixo.

Figura 8 – Demarcação dos pontos de teste

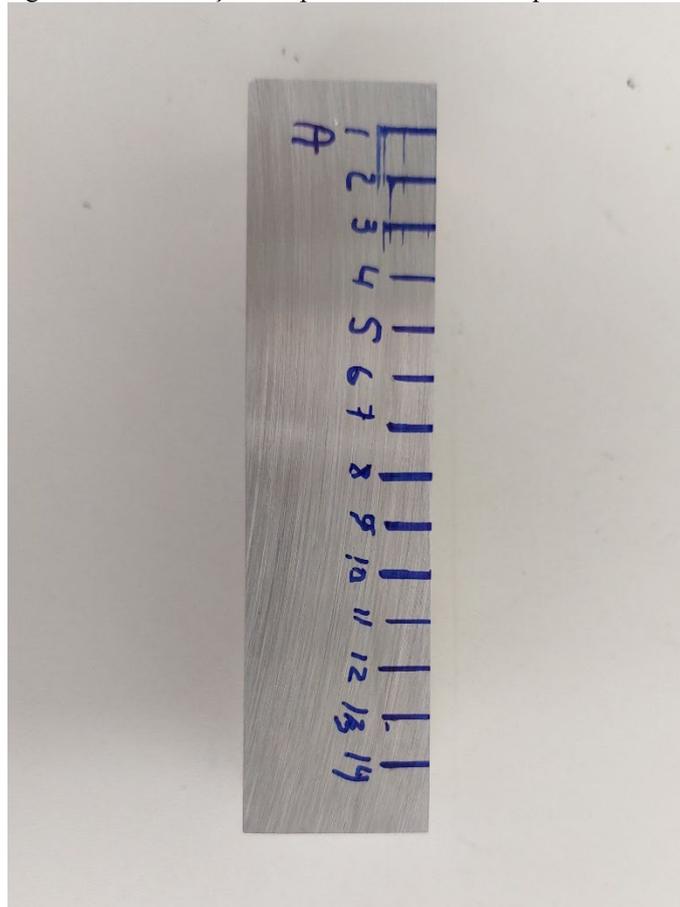


Fonte: O autor

3.6 Demarcação das distâncias entre os testes

Dando início a demarcação dos pontos de ensaio definidos anteriormente, foi usada uma caneta de retroprojektor para ter maior precisão nos testes. Para não interferir no ensaio de dureza, as distâncias e os pontos do ensaio foram marcados na superfície adjacente a área testada, denominadas de área A e área B.

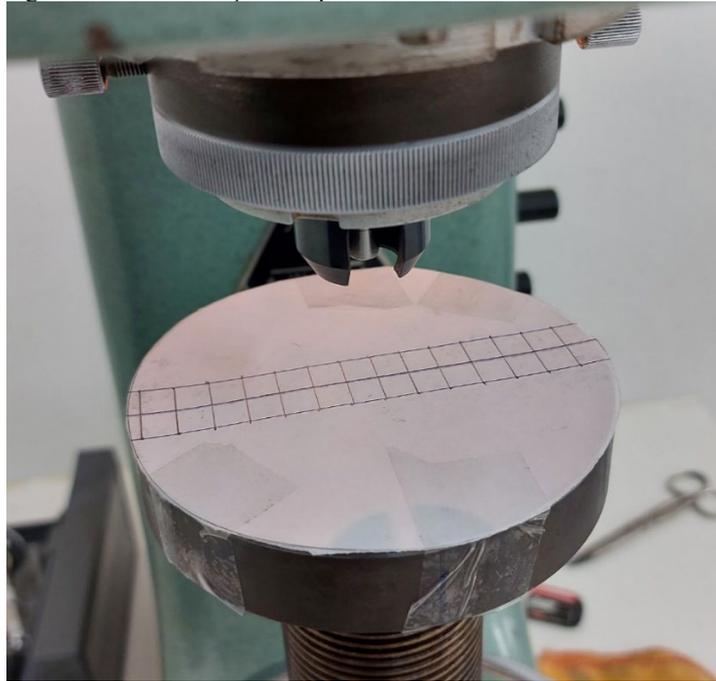
Figura 9 - Demarcação dos pontos de testes na superfície A



Fonte: O autor

Após a demarcação dos pontos de ensaio no material, foi demarcado também na máquina de testes, usando um papel para marcar as duas fileiras de testes, uma para Brinell e outra para Rockwell B. Com isso foi possível ter uma precisão na medição dos testes nas duas escalas, sem que a peça saia da orientação horizontal nem vertical durante a medição, resultando em uma fileira de testes alinhada durante toda a peça.

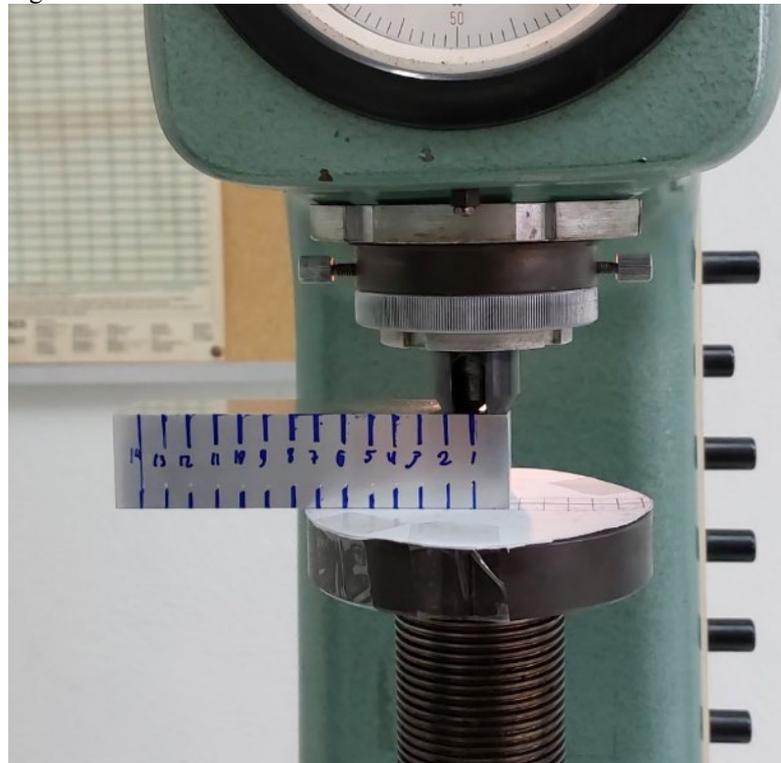
Figura 10 – Demarcação dos pontos no durômetro



Fonte: O autor

A seguir há a figura para demonstração da posição do material na máquina durante os ensaios.

Figura 11 – Demonstrativo do material no durômetro



Fonte: O autor

Essa imagem ilustra com precisão o posicionamento do material durante o teste, evitando resultados com desvio por função do posicionamento.

3.7 Realização dos ensaios em Rockwell

Após toda a criação da metodologia de testes para garantir o máximo de precisão possível, foi dado início aos testes. Começando pela Rockwell B, como dito anteriormente, o valor da dureza é dado diretamente no visor da máquina, não necessitando de nenhuma conta adicional para obtê-lo, bastando somente anotar.

Figura 12 – Leitura dos resultados



Fonte: O autor

3.8 Realização dos ensaios em Brinell

Como dito anteriormente, para a obtenção da dureza em Brinell, é necessário realizar a medição da calota causada pela máquina utilizando de uma lupa graduada para medir o diâmetro da calota e então utilizar-se de uma fórmula para chegar ao valor da dureza:

$$HB = \frac{2F}{\pi.D(D-\sqrt{D^2-d^2})} \quad (4)$$

Onde:

F = Força utilizada no teste (N)

D = Diâmetro do penetrador usado (mm)

d = Diâmetro da calota (mm)

3.8.1 Primeira medição em Brinell

A primeira medição foi feita usando uma lupa graduada de escala centesimal pertencente ao laboratório do grupo unis para realizar as medições dos diâmetros e então utilizar o valor obtido na fórmula acima.

Figura 13 – Lupa para medições



Fonte: O autor

Usando a primeira medição como exemplo, temos o valor do primeiro diâmetro igual a 1,08 mm. Utilizando a fórmula substituindo os valores do diâmetro da esfera de 5mm e da força de 250n, temos:

$$HB = \frac{2 * 187,5}{\pi * 5(5 - \sqrt{5^2 - 1,08^2})}$$

$$HB = 202,26 \text{ HB}$$

3.8.2 Segunda medição em Brinell

A segunda medição foi feita usando uma máquina de medição a laser localizada no laboratório de medição de uma empresa do setor automobilístico na cidade Varginha. Essa máquina é usada primariamente para ensaio de capacidade de produção das peças, verificando se estão dentro dos conformes das montadoras, então possui uma resolução e precisão mais altas que o equipamento usado na primeira medição

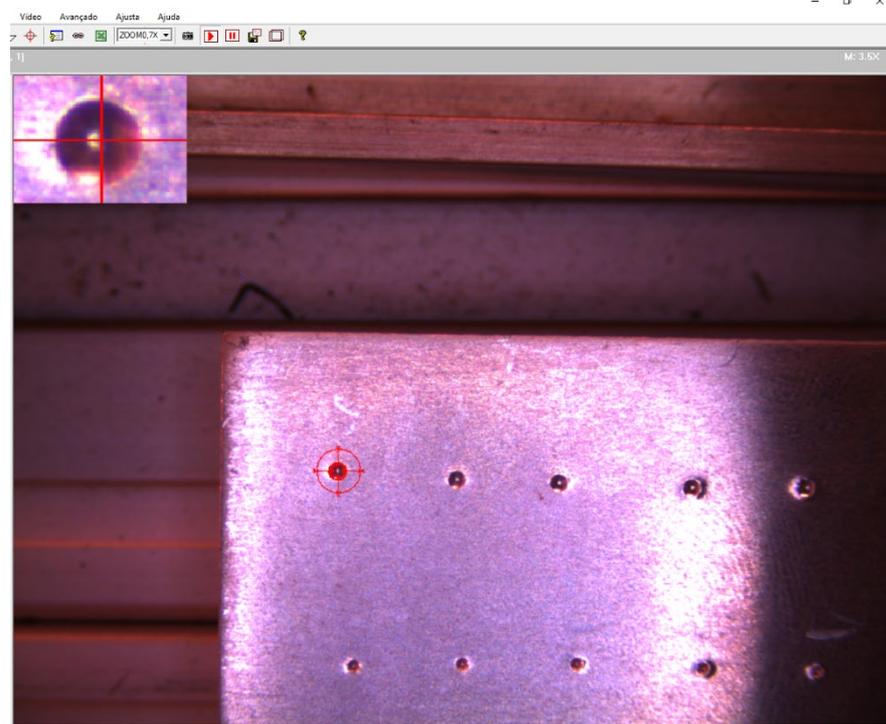
Figura 14 – Máquina de medição laser



Fonte: O autor

Para a realizar a medição na máquina basta alinha o ponto vermelho no centro do furo e dar 2 clicks na tela, o resultado é dado em uma janela ao lado, bastando anotar o valor do diâmetro da calota.

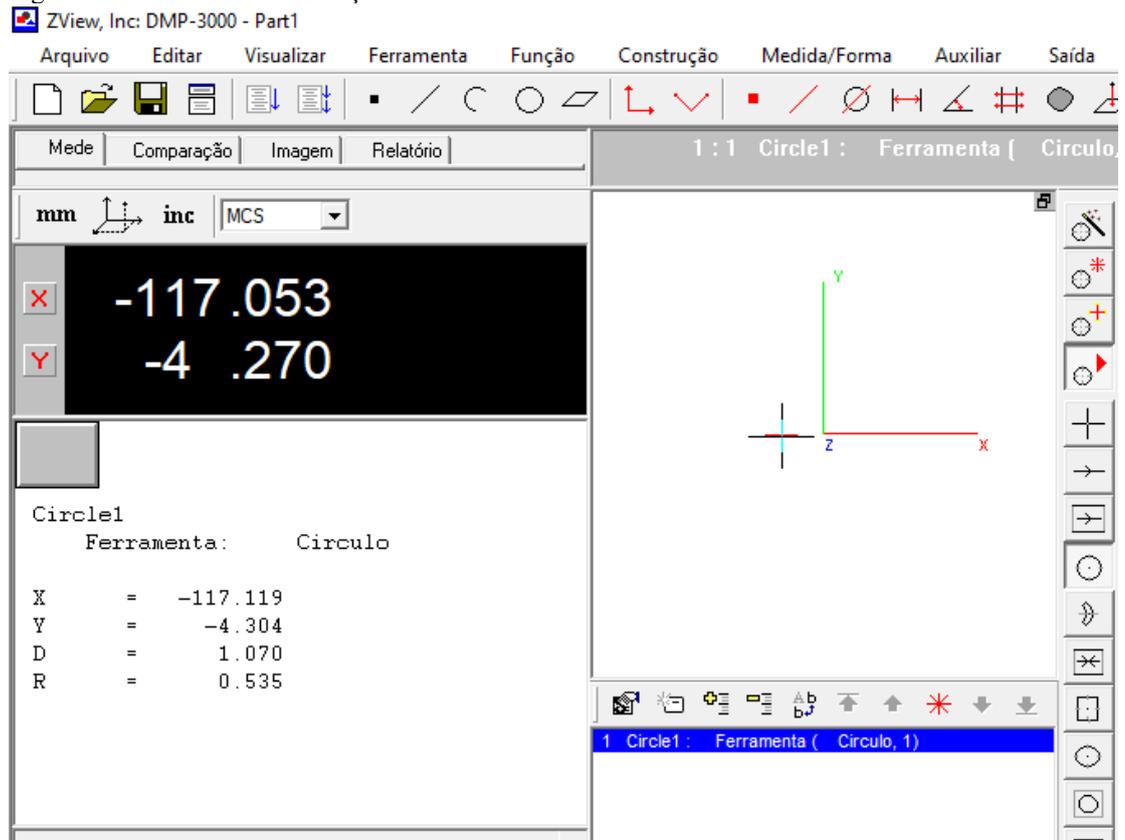
Figura 15 – Realização da medição



Fonte: O autor

Após a medição o resultado é projetado conforme figura a seguir:

Figura 16 – Resultados da medição



Fonte: O autor

Os resultados são projetados no quadro a esquerda, variando conforme a necessidade do usuário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após todos os testes realizados, foram anotados em uma tabela os diâmetros das calotas medidos utilizando os dois métodos de medição acima e depois convertidos para Brinell utilizando a fórmula citada anteriormente e para Rockwell B usando a tabela em anexo.

Resultados da superfície A, do lado esquerdo foi utilizado a lupa graduada do laboratório do Centro Universitário do Sul de Minas e a direita o medidor a laser.

Quadro 1 – Resultados da primeira medição

Lupa Graduada UNIS			Medidor a laser		
Diâmetro	Brinell	Rockwell B	Diâmetro	Brinell	Rockwell B
1,10	194	92	1,093	197	92
1,09	198	93	1,099	195	92
1,16	174	89	1,106	192	92
1,10	196	92	1,096	196	92
1,12	189	91	1,109	191	91
1,16	174	89	1,108	192	92
1,02	227	97	1,104	193	92
1,15	179	90	1,113	190	91
1,15	178	89	1,093	197	92
1,12	187	91	1,103	193	92
1,06	210	94	1,093	197	92
1,13	186	91	1,099	195	92
1,11	193	92	1,080	202	93
1,10	194	92	1,073	204	93

Fonte: O autor

Resultados da superfície B, seguindo a mesma lógica do quadro anterior, do lado esquerdo as medições feitas no laboratório do UNIS e do lado direito as medições feitas no medidor a laser.

Quadro 2 – Resultados da segunda medição

Lupa Graduada UNIS			Medidor a laser		
Diâmetro	Brinell	Rockwell B	Diâmetro	Brinell	Rockwell B
1,03	224	96	1,068	206	94
1,10	196	92	1,078	203	93
1,07	206	94	1,079	202	93
1,11	191	91	1,076	203	93
1,06	210	94	1,077	203	93
1,17	171	89	1,089	198	93
1,07	208	94	1,072	205	94
1,10	194	92	1,078	203	93
1,09	198	93	1,075	204	93
1,01	231	97	1,086	200	93
1,12	189	91	1,088	199	93
1,06	212	95	1,081	201	93
1,19	166	88	1,078	203	93
1,07	206	94	1,086	200	93

Fonte: O autor

Após todos os testes realizados e realizadas as conversões de Brinell para Rockwell B, obteve-se a tabela final com os ensaios em Rockwell B das duas superfícies, nos três testes realizado.

Quadro 3 – Testes em Rockwell B

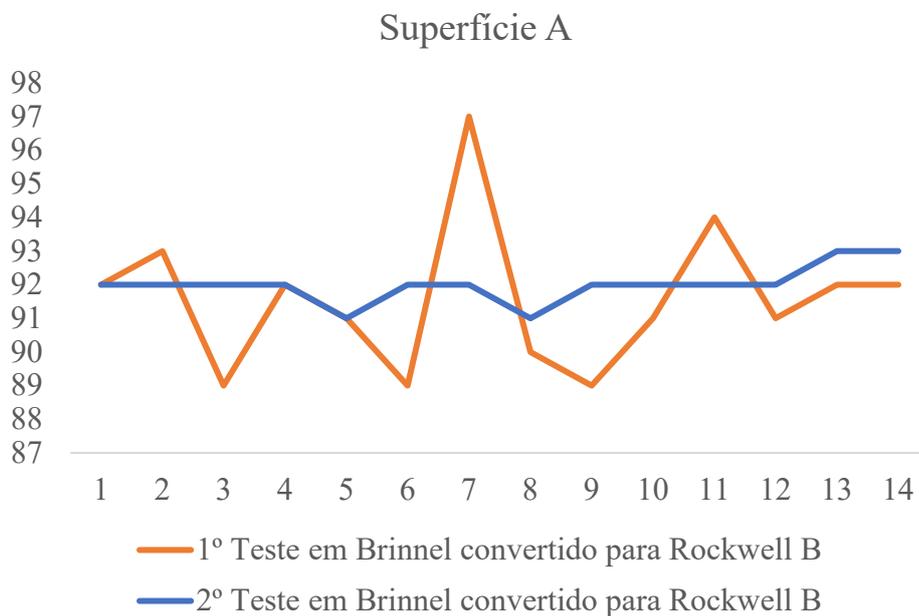
Superfície A			Superfície B		
1º Medição	2º Medição	3º Medição	1º Medição	2º Medição	3º Medição
89	92	92	91	96	94
90	93	92	93	92	93
91	89	92	92	94	93
91	92	92	93	91	93
92	91	91	93	94	93
92	89	92	94	89	93
92	97	92	92	94	94
92	90	91	93	92	93
92	89	92	93	93	93
92	91	92	93	97	93
92	94	92	93	91	93
92	91	92	93	95	93
91	92	93	93	88	93
92	92	93	93	94	93

Fonte: O autor

Fazendo uma análise inicial na tabela acima que contém os resultados de dureza nas duas superfícies, é possível observar que a média de dureza resultado em aproximadamente 92 HRB. Comparando estes dados com tabelas de fornecedores disponíveis online, como IMPERIO DOS METAIS e GGD METAIS, que informam uma dureza média de 88 HRB, é possível constatar que o material usado para testes neste trabalho se trata de Alumínio 7075-T651, sendo feito um tratamento dureza adicional na sua composição, resultado em um aumento de dureza de aproximadamente 5%. De acordo com BARBOSA, 2014 a liga 7075-T651 possui uma dureza média de 92 HRB quando tratada termicamente com temperaturas altas e usando uma rampa de aquecimento mais lenta., confirmando a média de dureza obtida nos testes feitos na amostra obtida neste trabalho.

Com os dados obtidos na tabela final dos testes, é possível analisar estatisticamente os dados. Por mais que numericamente estejam próximos, a estabilidade que se consegue a partir do aumento da resolução da medição é significativa, como mostra os gráficos das superfícies A e B abaixo:

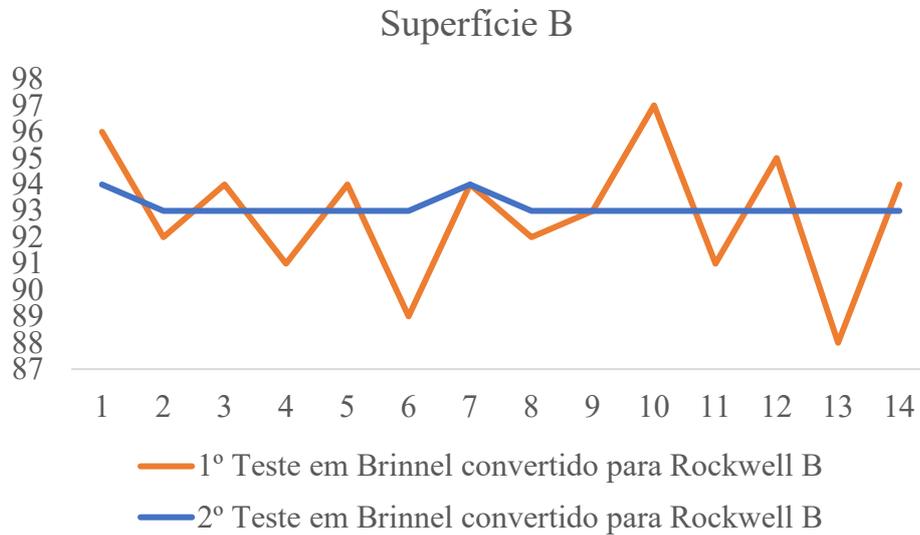
Gráfico 1 - Comparação dos ensaios na superfície A



Fonte: O autor

Resultados da superfície B:

Gráfico 2 - Comparação dos ensaios na superfície B



Fonte: O autor

Outro dado que é possível obter comparando os ensaios nos dois equipamentos é a dispersão gerada pelos ensaios, com o segundo ensaio feito no medidor a laser apresentando uma dispersão bem menor em relação aos testes feitos no laboratório do UNIS, com os resultados se igualando em muitos pontos a dureza medida diretamente em Rockwell B.

Além da estabilidade nos ensaios, é possível também que existe uma diferença na dureza em relação as superfícies dos testes. Enquanto o lado A possui uma média de 92 HRB, o lado B tem uma média de dureza de 93 HRB, isso se dá pelas características de produção do material, que gera uma variação em relação a área.

Ademais, os resultados gerados pelos dois testes variância e desvio padrão diferentes um do outro, resultado dá precisão oferecida por cada uma das medições:

Quadro 4 – Resultados superfície A

Superfície A			
Teste	Média	Variância	Desvio Padrão
2	91,57	4,73	2,17
3	92,00	0,31	0,55

Fonte: O autor

Quadro 5 – Resultados superfície B

Superfície B			
Teste	Média	Variância	Desvio Padrão
2	92,86	6,44	2,54
3	93,14	0,13	0,36

Fonte: O autor

Para a realização de uma análise estatística mais profunda nos ensaios realizados, foi feito um estudo da capacidade de processo utilizando o software Minitab. Para objetivos de comparação, usada uma tolerância de +- 4 HRB para a dureza encontrada no material, observando que essa é uma tolerância usada com frequência em projetos na indústria automobilística, em diferentes materiais usados para processos de corte, moldes, etc. Em anexo segue um projeto de uma faca circular para corte de massa de borracha, usada num cilindro de mistura em uma empresa do ramo automobilístico.

Para a realização dos testes no Minitab, foi usado o diâmetro de cada testes, e para calcular o diâmetro mínimo e máximo, foi usado os limites de HRB inferior e superior mencionados acima, convertendo-os para Brinell e então utilizando a fórmula (1) para chegar nos diâmetros mínimo e máximo. Realizando a conversão para Brinell utilizando a tabela em anexo, temos 175 – 216 HB, e logo após a conversão para o diâmetro:

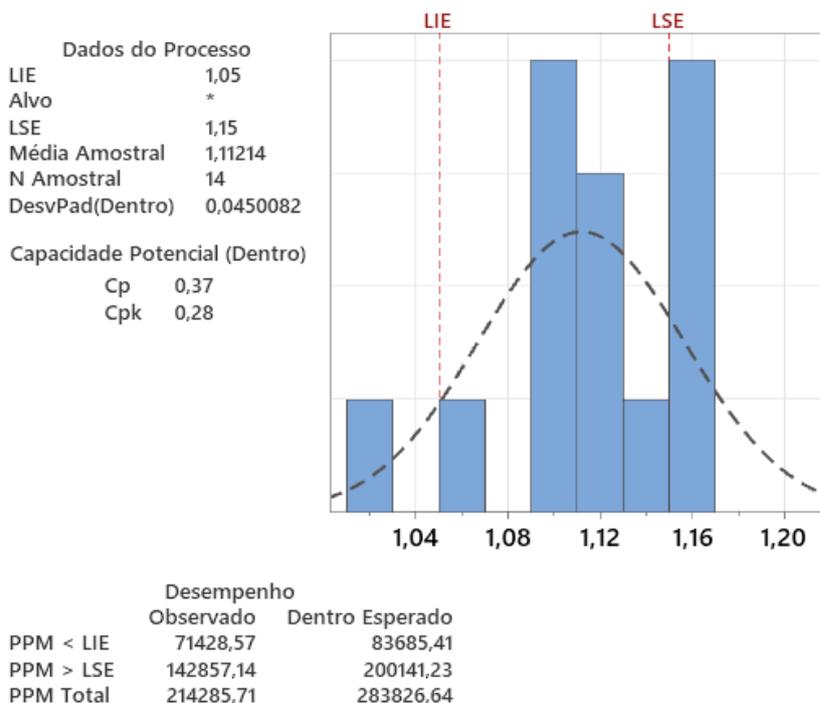
$$Diâmetro\ máximo = 175 = \frac{2 * 187,5}{\pi * 5(5 - \sqrt{5^2 - d^2})} = 1,15\ mm$$

$$Diâmetro\ mínimo = 216 = \frac{2 * 187,5}{\pi * 5(5 - \sqrt{5^2 - d^2})} = 1,05\ mm$$

Portanto, o diâmetro máximo que será usado como tolerância no estudo de capacidade no minitab será 1,15mm e o diâmetro mínimo será de 1,05mm, possibilitando uma análise mais aprofundada dos ensaios.

Gráfico 3 – Capacidade superfície A lupa Unis

Capacidade Superfície A - Lupa graduada UNIS



A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: O autor

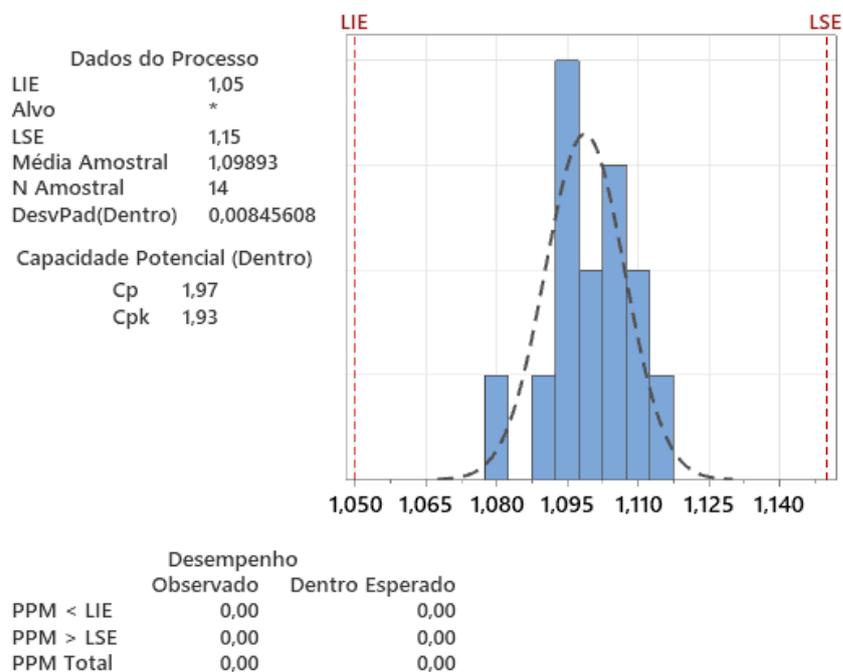
O gráfico acima foi gerado a partir de uma análise de capacidade dentro do Minitab e dentro deles temos diversos dados que mostram a capacidade de um processo de cumprir uma certa tolerância especificada. Na coluna da esquerda são mostrados dados básicos das estatísticas como número da amostragem, média e desvio padrão da amostra. Abaixo temos os valores de CP e CPK. Conforme indica o artigo Controle Estatístico de Processos (2019), os valores de CP resultam da comparação da tolerância com a dispersão do processo e desta forma representam uma medida para a capacidade potencial do processo, já o CPK se baseia no mesmo fundamento anterior, mas considera no cálculo a posição do processo, ou seja, o deslocamento dos valores em relação à média. Ainda conforme artigo Controle Estatístico de Processos (2019), para que um processo seja estável, o CP e CPK mínimo deve ser > 1 , caso contrário o processo não é capaz de cumprir a tolerância e irá gerar perdas. STEINER, ABRAHAM E MACKAY (1998) referenciam que em diversos processos necessitam de um índice de CP e CPK acima de 1,33 em projetos em série para que sejam aceitáveis para produção. Ainda conforme STEINER, ABRAHAM E MACKAY (1998), para novos processos ou processos que envolvem riscos, é necessário um valor $> 1,67$, garantindo a estabilidade do processo no início.

Outro dado importante mostrado na análise de capacidade é PPM, que é uma sigla para perdas por milhão, tanto inferior quanto superior a tolerância estipulada. Ela mostra a probabilidade de quantos dados seriam descartados caso essa análise fosse feita 1 milhão de vezes.

Dotando se dos dados informados nos gráficos, podemos perceber que a primeira medição feita no UNIS sob a superfície A não atenderia o requisito mínimo para ser um processo estável, dado que seu CP e CPK foram muito inferiores a 1, gerando uma perda no processo de quase 1/3 dos ensaios feitos.

Gráfico 4 – Capacidade superfície A medidor laser

Capacidade Superfície A - Medidor Laser



A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

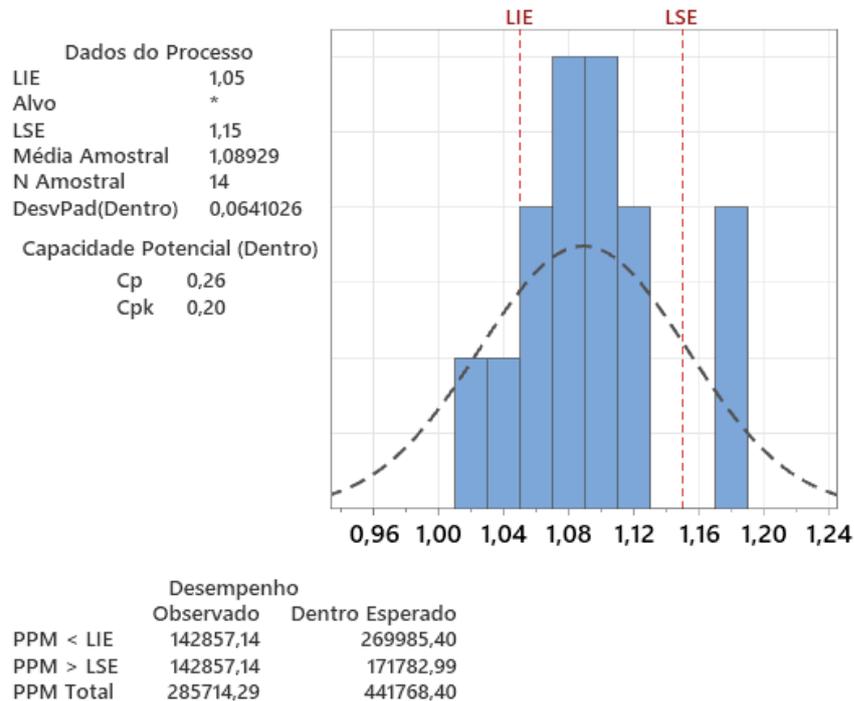
Fonte: O autor

Realizando o mesmo estudo da superfície A na máquina de medidor a laser, pode se obter um resultado muito melhor, com um Cp e Cpk de 1,97 e 1,93 respectivamente, demonstrando uma dispersão muito menor da curta em relação aos limites inferior e superior, como também uma maior concentração das amostras em torno da média.

Além disso, o gráfico acima mostra um PPM muito próximo a zero, mostrando que a medição feita usando um equipamento com resolução alta retorna resultados mais confiáveis, dando estabilidade para o processo.

Gráfico 5 – Capacidade superfície B lupa Unis

Capacidade Superfície B - Lupa graduada UNIS



A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

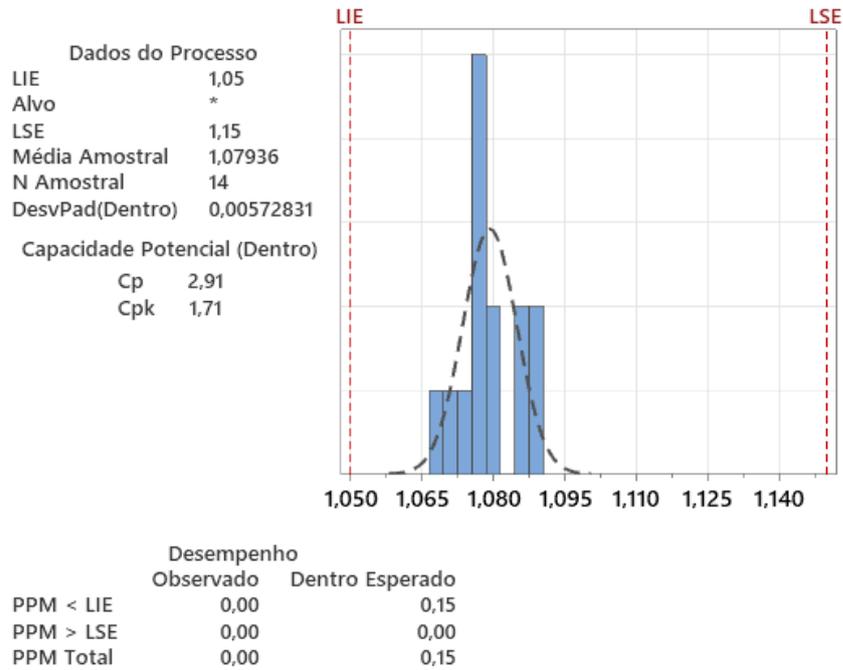
Fonte: O autor

Analisando a superfície B, temos uma distorção ainda maior nas medições, obtendo um Cp e Cpk de 0,26 e 0,20 respectivamente, ficando muito inferior do mínimo igual 1 para que o processo seja capaz de ser executado.

Ademais, a projeção das perdas por milhão mostrada na parte inferior do gráfico mostra uma piora bastante elevada em relação a superfície B, com quase 45% das amostras fora dos limites inferior e superior, com potencial de causar grandes prejuízos ao processo.

Gráfico 6 – Capacidade superfície B medidor laser CSA

Capacidade Superfície B - Medidor Laser



A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: O autor

Com a análise da superfície B utilizando o medidor a laser, pode se observar uma dispersão dos valores do mesmo modo que foi visto na superfície A, com resultados de Cp e Cpk bastante elevados, se encaixando nos critérios de aprovação mínimos de um processo estável. O PPM por outro lado se mostrou muito baixo, menos de uma perda por milhão.

5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados aqui nestes testes demonstram que o método usado na medição do diâmetro no ensaio de dureza Brinell pode causar uma variação significativa no resultado final. O aumento da resolução no equipamento de medição do diâmetro da calota traz para o estudo uma estabilidade muito maior, produzindo resultados mais confiáveis nos ensaios e, como isso, trazendo mais segurança no processo.

A dureza do material é um dado muito importante na produção de diversos componentes na industrial atualmente, a imprecisão na medição deste dado pode trazer consequências perigosas dependendo do produto que está sendo usada. Por exemplo, uma fuselagem de avião que tiver a sua estrutura medida em Brinell e convertida para Rockwell B, sem usar um equipamento de medição adequado, pode ter sua vida útil prevista reduzida drasticamente, podendo levar a sérios acidentes com potencial de gerar vítimas fatais no processo. Ademais, a imprecisão gerada nos ensaios pode gerar riscos financeiros a empresas, o alumínio aeronáutico tem sua empregabilidade muito usada no setor automobilístico e isso pode causar o desgaste prematuro de componentes como eixos, rolamentos e peças internas de motores de automóveis, necessitando de manutenções extras ou até a troca desses componentes.

Com tudo, é possível concluir que o objetivo principal do trabalho foi alcançado de maneira satisfatória, pois os dados estatísticos que foram mostrados nesse artigo demonstram a variação entre os testes 2 e 3 após a conversão de Brinell para Rockwell B em alumínio aeronáutico, podendo assim ter seu estudo reproduzido em outros materiais.

REFERÊNCIAS

- ANUSAVICE, K.J., 2005, “**Phillips Materiais Dentários**”, Elsevier, 11ª ed., Rio de Janeiro, p.764
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6506-1: **Materiais metálicos Ensaio de dureza Brinell - Parte 1: Método de Ensaio**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6506-2: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell - Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6506-3: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell - Parte 3: Calibração de blocos de referência**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6506-4: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell - Parte 4: Tabela de valores de dureza**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6508-1: **Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell - Parte 1: método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6508-2 **Materiais metálicos Ensaio de dureza Rockwell - Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio e penetradores**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6508-2: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell - Parte 3: Calibração de blocos de referência**. Rio de Janeiro. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Consumo de produtos de alumínio no Brasil cresce 10,9% em 2021 e registra o maior volume da história**. 2022. Disponível em <<https://abal.org.br/noticia/consumo-de-produtos-de-aluminio-em-2021-registra-o-maior-volume-historico/>>. Acesso em 23.maio.2022
- BARBOSA, Leonardo de Mello. **Influência da taxa de aquecimento no tratamento de solubilização da liga Al 7075**. 2014. Disponível em <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/379>>. Acesso em 28.out.2022
- BERTOL, Helton Claudio. **Determinação de critérios para aceitação de medições de dureza realizadas com durômetros portáteis em regiões de soldas**. 2009. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/21396>>. Acesso em 10.maio.2022.
- BERTOLDI, Evandro. "Análise de Ensaio de Dureza Brinell e Rockwell em Corpo de Prova". 2014. <https://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2014/Analise_de_ensaios_de_dureza.pdf>. Acesso em 03.maio.2022
- BRAGA, Ana Paola Villalva. **Análise de ligas de alumínio aeronáuticas conformadas por jateamento com granalhas-caracterização e previsão de deformação**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em

<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-24052011-151943/en.php>>. Acesso em 08.maio.2022

CALLISTER, Jr. e WILLIAM, D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ªed. São Paulo. LTC. 2002.

CAPELARI, Tiago Valdameri. **Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052**. 2006.

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11961/000618836.pdf?sequence=1>>. Acesso em 01.maio.2022

DE LIMA, Diego Rodolfo Simões; YURGEL, Charles Chemale; SCHAEFFER, Lirio. **Caracterização da evolução da micro dureza vickers no processo de forjamento de alumínio**. 2007. Disponível em <<http://www.cbcm-metalforming.com/publicacoes/2007/07%2005.pdf>>. Acesso em 05.maio.2022.

GALVINFOCENTER. **Medição de dureza de chapas revestidas**. 2012. Disponível em <http://www.icz.org.br/site/pdf/galvanizacao/GalvInfoNote_5_1.pdf>. Acesso em 23.maio.2022

GARCIA, Amauri, Jaime Alvares Spim, and Carlos Alexandre dos Santos. **Ensaaios dos materiais**. Livros Técnicos e científicos, 2000.

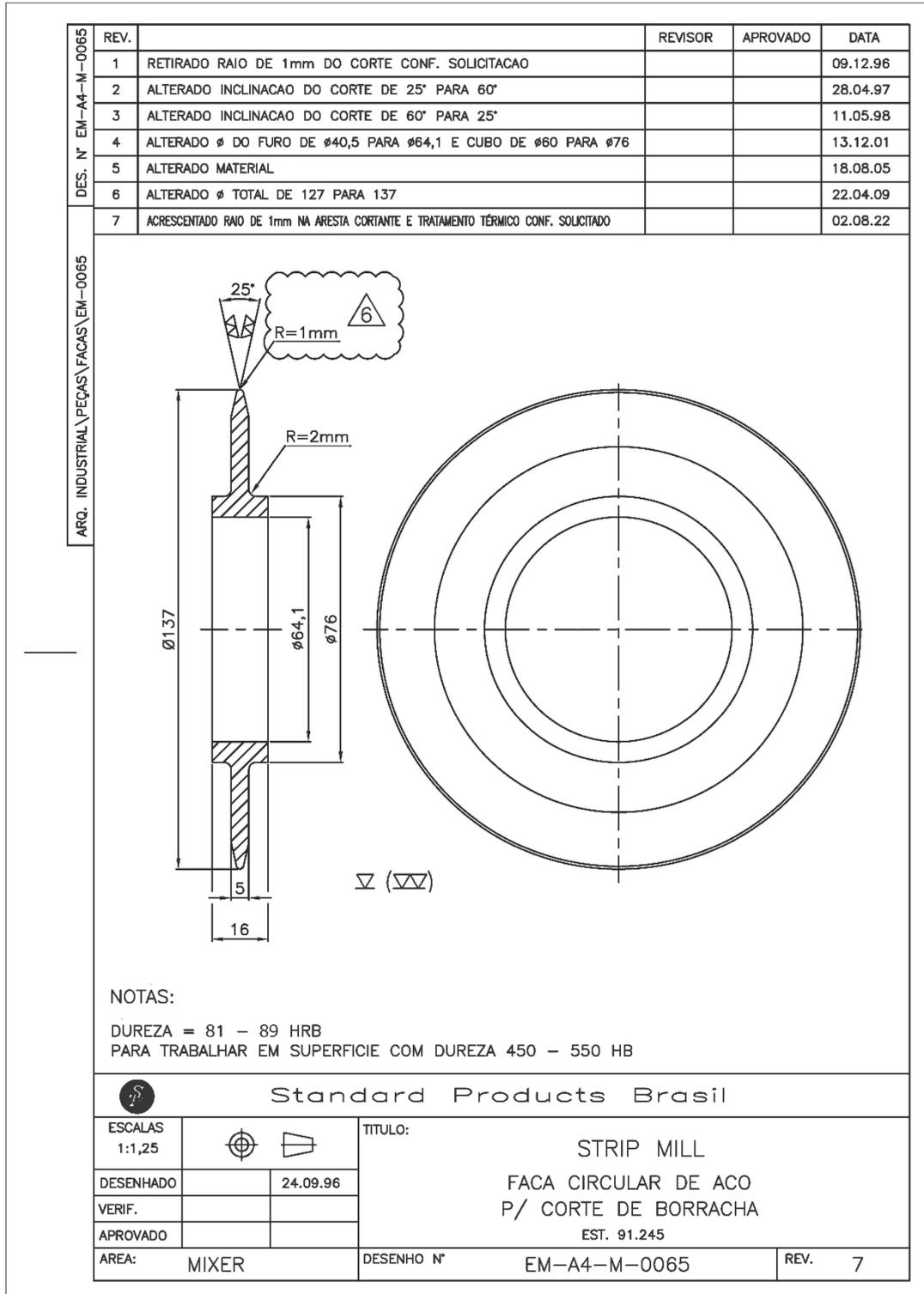
GGD METALS. **Alumínio T7075-T651**. 2022. Disponível em <<https://www.ggdmetals.com.br/produto/aluminio-7075-t651/>>. Acesso em 29.out.2022

SMITH, W. **Structure and properties of engineering alloys**. New York, 1993

STEINER, Stefan H. (et. al). **Understanding Process Capability Indices**. 1998. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/2497218_Understanding_Process_Capability_Indices>. Acesso em 29.out.2022

TREVISAN, Claudemir. **Desgaste de órgãos ativos de máquinas e implementos agrícolas de preparo do solo: avaliação bibliográfica**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-09112007-101834/pt-br.php>>. Acesso em 12.maio.2022.

Anexo A – Faca circular de aço



Fonte: Cooper Standard Automotive

Anexo B – Tabela de conversão de dureza



Tabela de Conversão de Dureza

Rockwell C HRC	Brinell HB	Vickers HV	Dureza Rockwell			Dureza Shore
			Escala A HRA	Escala B HRB	Escala D HRD	
26	258	272	63,3	(102,5)	44,6	38
25	253	266	62,8	(101,5)	43,8	38
24	247	260	62,4	(101,0)	43,1	37
23	243	254	62,0	100,0	42,1	36
22	237	248	61,5	99,0	41,6	35
21	231	243	61,0	98,5	40,9	35
20	226	238	60,5	97,8	40,1	34
(18)	219	230	-	96,7	-	33
(16)	212	222	-	95,5	-	32
(14)	203	213	-	93,9	-	31
(12)	194	204	-	92,3	-	29
(10)	187	196	-	90,7	-	28
(8)	179	188	-	89,5	-	27
(6)	171	180	-	87,1	-	26
(4)	165	173	-	85,5	-	25
(2)	158	166	-	83,5	-	24
(0)	152	160	-	81,7	-	24

Fonte: Iguafer Aços