

ANA PAULA PEREIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO
CÍCLICA EM TESTES DE INDENTAÇÃO
INSTRUMENTADA: EFEITO “SHAKEDOWN”**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

ANA PAULA PEREIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO CÍCLICA EM TESTES
DE INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA: EFEITO “SHAKEDOWN”**

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
**BACHAREL em ENGENHARIA
MECÂNICA.**

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins
da Silva Jr.

Assinatura do Orientador

UBERLÂNDIA - MG

2018

ANA PAULA PEREIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO CÍCLICA EM TESTES
DE INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA: EFEITO “SHAKEDOWN”**

Projeto de conclusão de curso
_____ pelo Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Jr. – UFU – Orientador

Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan- UFU

MSc. Vinícius Carvalho Teles – UFU

Uberlândia, julho de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos, por todo amor, apoio, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, primeiramente por terem me dado a vida, por todo o sacrifício, por cada exemplo de determinação, honestidade e integridade dados a mim todos os dias da minha vida. Pessoas nas quais me orgulho e sinto gratidão por todo amor oferecido a mim.

Ao professor, orientador e amigo Washington por toda paciência, dedicação e zelo prestados a mim durante toda a execução deste trabalho, que só foi possível devido ao seu comprometimento, carinho e entusiasmo dedicado à sua profissão.

Aos meus irmãos, Vanessa e Róbson, o meu muito obrigada por todo carinho, apoio e cuidado em cada momento da minha vida e ao longo da faculdade.

Meus queridos amigos da universidade, em especial à Andressa, pessoas que deixaram a caminhada mais leve e não mediram esforços para me ajudar nos momentos de dificuldade.

Agradeço também ao doutorando Vinicius pelo auxílio prestado durante toda a elaboração desta pesquisa, que foi de suma importância.

Pereira, A. P. **Análise Experimental da deformação cíclica em Testes de Indentação Instrumentada: Efeito “Shakedown”**. 2018. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

Shakedown é o nome do efeito da transição do comportamento do material que ao ser submetido a carregamentos cíclicos, inicialmente responde plasticamente, e após uma determinada quantidade de ciclos de carregamento passam a responder de forma perfeitamente elástica. Esse tipo de fenômeno ocorre em situações de carregamento cíclico e com alta tensão de contato como o contato roda-trilho de uma ferrovia. Um diagrama que relaciona carga e atrito pode ser usado para prever a resposta do material em variadas condições de operação, possibilitando a escolha de materiais e parâmetros operacionais que proporcionarem o melhor desempenho da ferrovia. Dessa forma, a correta escolha de parâmetros operacionais garante uma boa capacidade de carga e boa frenagem, associados à uma boa vida útil do material solicitado. Uma das formas de realizar a análise de deformação plástica é através de ensaios de dureza instrumentada. Nesse trabalho, um equipamento foi adaptado para a realização de testes de dureza instrumentada em posições controladas de uma amostra. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é reproduzir o fenômeno *shakedown* através de ensaios de indentação instrumentada em uma mesma posição.

Palavras-chave: Carregamento Cíclico, Efeito Shakedown, Atrito, Indentação instrumentada

Pereira, A. P. **Experimental Analysis of Cyclic Deformation in Instrumented Indenting Tests: Shakedown Effect.** 2018. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

Abstract

Shakedown is the name of the effect of the transition of the behavior of the material that when submitted to cyclic loading, initially responds plastically, and after a certain amount of loading cycles respond to a perfectly elastic response. This type of phenomenon occurs in situations of cyclic loading and with high contact stresses such as wheel-rail contact of a railway. A load and friction-related diagram can be used to predict material response under varying operating conditions, allowing the choice of materials and operating parameters that provide the best performance of the railway. Thus, the correct choice of operational parameters guarantees good load capacity and good braking, associated to a good life of the requested material. In addition to analyzing the influence of different mechanical properties and friction on the shakedown phenomenon in wheel-rail contact when subjected to a cyclical loading for a possible technological alternative in order to solve tribological problems in the construction of structural projects. One of the ways to analyze the plastic deformation is through instrumented hardness tests. In this work, an equipment was adapted to perform instrument hardness tests in controlled positions of a sample. Thus, the objective of this work is to reproduce the shakedown phenomenon through instrumented indentation tests in the same position.

Keywords: Cyclic Loading, Shakedown Effect, Friction, Instrumented Indentation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva de indentação Carga x Deslocamento [P _{xh}] para material elasto-plástico (ARAÚJO, R. ET AL, 2013).....	2
Figura 2: Representação Esquemática da impressão no ensaio Rockwell (SENAI, 2018).	5
Figura 3: Ilustração esquemática de um corpo deslizando sobre uma superfície (MUNDO EDUCAÇÃO, 2018).	8
Figura 4: Diferentes formas de resposta ao carregamento cíclico: (a) perfeitamente elástica, (b) shakedown, (c) plasticidade cíclica, (d) ratchetting. (WILLIAMS, 2005).	11
Figura 5: Indentador Instrumentado – Imagem do equipamento.	14
Figura 6: Esquema do sistema de medição de posição.	15
Figura 7: Penetrador Vickers (WIKIPEDIA, 2016).	16
Figura 8: Penetrador Rockwell (SENAI, 2018).	17
Figura 9: Painel Frontal do Programa em LabView®.	18
Figura 10: Carga x Deslocamento - Vickers 0,5N.....	20
Figura 11: Carga x Deslocamento - Vickers 1N.....	21
Figura 12: Carga x Deslocamento – Rockwell-C 0,5N.....	22
Figura 13: Carga x Deslocamento - Ensaio Rockwell-C 1N.....	23
Figura 14: Impressão do Ensaio Vickers 0,5N.....	25
Figura 15: Ensaio Vickers - Dureza x Ciclo - 0,5N.....	26
Figura 16: Ensaio Vickers - Dureza x Ciclo – 1N.....	27
Figura 17: Impressão do Ensaio Rockwell 0,5N.....	28
Figura 18: Ensaio Rockwell-C - Dureza x Ciclo - 0,5N.	29
Figura 19: Ensaio Rockwell-C Dureza x Ciclo - 1N.	30
Figura 20: Inclinação Ensaio Vickers 0,5N.....	31
Figura 21: Inclinação Ensaio Vickers 1N.....	31
Figura 22: Inclinação Ensaio Rockwell 0,5N.	32
Figura 23: Inclinação Ensaio Rockwell 1N.	33

LISTA DE ABREVIATURAS DE SIGLAS

HV – Dureza Vickers

HR – Dureza Rockwell

HRC – Dureza Rockwell C

A – Área

Fa – Força de atrito

μ - Coeficiente de atrito

N – Força normal

V – Velocidade de aplicação da carga

Tc – Tempo do ciclo

L – Comprimento

D – Diâmetro

P – Profundidade

LTM – Laboratório de Tribologia dos Materiais

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. Dureza.....	2
2.2. Cálculo da dureza Vickers.....	3
2.3. Cálculo da dureza Rockwell.....	4
2.3.1. Profundidade de penetração no Ensaio Rockwell.....	6
2.4. Tribologia.....	6
2.5. Atrito.....	8
2.6. Mecânica do Contato.....	9
2.6.1. Teoria de Hertz.....	10
2.7. Fenômeno <i>Shakedown</i>	11
3. METODOLOGIA.....	12
3.1. Preparação da Amostra.....	12
3.1.1. Lixamento.....	13
3.1.2. Polimento.....	13
3.2. Equipamento de teste – Indentador Instrumentado.....	14
3.2.1. Dureza Vickers.....	16
3.2.2. Dureza Rockwell - C.....	16
3.3. Programa de controle do equipamento – LabVIEW®.....	17
3.4. Parâmetros de teste.....	19
4. RESULTADOS.....	20
4.1. Força em função do deslocamento do indentador.....	20
4.2. Cálculo da dureza em função dos ciclos.....	24
4.3. Evolução da constante de carregamento em função dos ciclos.....	30
5. CONCLUSÕES.....	34
6. TRABALHOS FUTUROS.....	34
BIBLIOGRAFIA.....	35

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho simula um fenômeno que ocorre entre as rodas e trilhos de uma via férrea, chamado efeito *shakedown*. Esse efeito se refere a resposta do material perfeitamente elástica após determinada quantidade de ciclos de carregamento. Foi observado também, que acima do limite *shakedown* ocorre um outro fenômeno, que é um exemplo de fluxo plástico incremental, ou conhecido como *ratchetting*. Nesse caso, cada passada sucessiva de uma roda sobre o trilho causa um pequeno incremento nas tensões plásticas, que se acumulam ao longo dos milhares de ciclos subsequentes. O fluxo plástico nucleia os vazios e microfissuras em defeitos logo abaixo da superfície, e a medida que a deformação continua, as microtrincas crescem e se juntam, até que um defeito é formado na superfície e se inicia o processo de fadiga. Essas microfissuras podem se propagar por fadiga de baixo ciclo, quando a vida é menor que 10^3 ciclos, impulsionada pelas tensões plásticas cíclicas, e o processo de falha pode ser um de cisalhamento dúctil causado pela deformação de cisalhamento progressivo da camada superficial.

O presente trabalho se concentra no estudo de processos de deformações plásticas e elásticas oriundos do carregamento cíclico, com ênfase na identificação do efeito *shakedown*. O objetivo desse trabalho é reproduzir o fenômeno *shakedown* através de ensaios de indentação instrumentada em uma mesma posição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Dureza

A dureza do material pode ser definida como sendo a resistência do metal à deformação plástica, ou seja, é a propriedade de um metal que lhe dá a capacidade de resistir à deformação quando um esforço é aplicado. Quanto maior a dureza do metal, maior a resistência à deformação. Na mineralogia, a dureza é caracterizada pela resistência que uma substância tem a ser arranhada por outra substância. Em metalurgia, pode se descrever a dureza como sendo a capacidade de um material para resistir à deformação plástica (CALLISTER, W. 1985).

Existe o método de medição de dureza por penetração instrumentada, conhecido também por dureza instrumentada. Este método consiste na utilização de penetradores de diamante ou metal duro na superfície de uma amostra, com forças e profundidade de penetração medidas e apresentadas em um gráfico na tela de um computador. Com esse método é possível caracterizar o comportamento plástico e elástico de um material.

A Figura 1 representa a curva de indentação instrumentada, no qual o eixo das abscissas representa o deslocamento sofrido pelo metal e o eixo das ordenadas representa a carga aplicada.

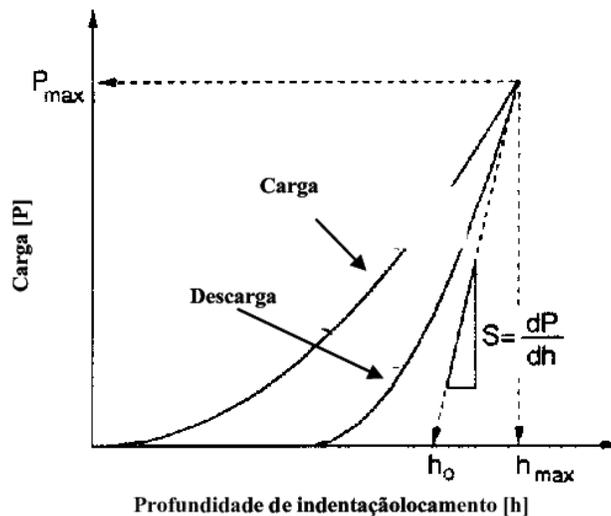


Figura 1: Curva de indentação Carga x Deslocamento [Pxh] para material elasto-plástico (ARAÚJO, R. ET AL, 2013).

Quando a carga é removida do indentedor, o material tende a retomar à sua forma original. Porém, devido ao encruamento (restrição do movimento de discordâncias devido a distorção na rede cristalina), o material é impedido de voltar a sua estrutura inicial. Para cada indentação realizada, uma curva $p-h$ foi gerada conforme os resultados obtidos na sessão dos resultados.

2.2. Cálculo da dureza Vickers

O ensaio desenvolvido por Smith e Sandland ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers porque a empresa que fabricava as máquinas mais difundidas para operar com este método chamava-se Vickers-Armstrong.

A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga.

O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área projetada da impressão (A) deixada no corpo ensaiado. Essa relação, expressa em linguagem matemática é a seguinte:

$$HV = \frac{F}{A} \quad (1.)$$

A máquina que faz o ensaio Vickers não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais (d_1 e d_2) formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide.

Conhecendo as medidas das diagonais, é possível calcular a área da pirâmide de base quadrada (A), utilizando a fórmula:

$$A = \frac{d^2}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{136}{2}\right)} \quad (2.)$$

Voltando à fórmula para cálculo da HV, e substituindo A pela fórmula acima, temos:

$$HV = \frac{F}{\frac{d^2}{2\text{sen}68^\circ}} \quad (3.)$$

$$HV = \frac{F \times 2 \text{sen } 68^\circ}{d^2} \quad (4.)$$

$$HV = \frac{(1,8544 F)}{d^2} \quad (5.)$$

Na Eq.(5), a força deve ser expressa em quilograma-força (kgf) e o “d” corresponde à diagonal média, ou seja:

$$d = \frac{(d1 + d2)}{2} \quad (6.)$$

E deve ser expresso em milímetro (mm). Se a máquina der o resultado em micron (m), esse valor deve ser convertido em milímetro.

Representação do resultado do ensaio A dureza Vickers é representada pelo valor de dureza, seguido do símbolo HV e de um número que indica o valor da carga aplicada. A representação 440 HV 30 indica que o valor da dureza Vickers é 440 e que a carga aplicada foi de 30 kgf (SENAI, VICKERS 2018).

2.3. Cálculo da dureza Rockwell

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita.

A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material. Os

penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade).

Quando se utiliza o penetrador cônico de diamante, deve-se fazer a leitura do resultado na escala externa do mostrador, de cor preta. Ao se usar o penetrador esférico, faz-se a leitura do resultado na escala vermelha.

Nos equipamentos com mostrador digital, uma vez fixada a escala a ser usada, o valor é dado diretamente na escala determinada.

O valor indicado na escala do mostrador é o valor da dureza Rockwell. Este valor corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraídas a recuperação elástica do material, após a retirada da carga maior, e a profundidade decorrente da aplicação da pré-carga. Em outras palavras: a profundidade da impressão produzida pela carga maior é a base de medida do ensaio Rockwell. Na Figura 2, segue a representação esquemática da profundidade produzida por um penetrador cônico de diamante.

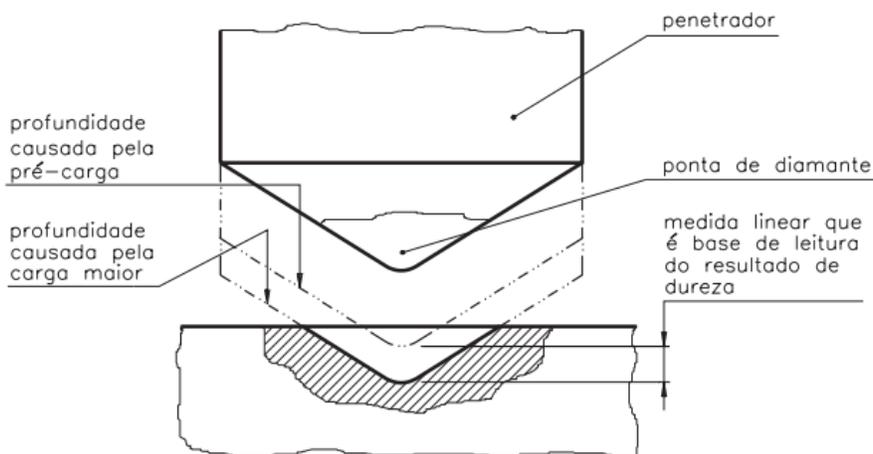


Figura 2: Representação Esquemática da impressão no ensaio Rockwell (SENAI, 2018).

Pode-se realizar o ensaio de dureza Rockwell em dois tipos de máquinas, ambas com a mesma técnica de operação, que diferem apenas pela precisão de seus componentes.

A máquina padrão mede a dureza Rockwell normal e é indicada para avaliação de dureza em geral.

A máquina mais precisa mede a dureza Rockwell superficial, e é indicada para avaliação de dureza em folhas finas ou lâminas, ou camadas superficiais de materiais.

Na máquina Rockwell normal, cada divisão da escala equivale a 0,02 mm; na máquina Rockwell superficial, cada divisão equivale a 0,01mm (SENAI, ROCKWELL 2018).

No ensaio realizado, utilizamos o ensaio Rockwell C, ou seja, mede a dureza Rockwell normal, logo a máquina utilizada a padrão, com penetrador cônico de diamante com 120° de conicidade, carga maior de ensaio de 150kgf e pré-carga de 10kgf e o resultado deve ser lido na escala preta.

2.3.1. Profundidade de penetração no Ensaio Rockwell

A profundidade que o penetrador vai atingir durante o ensaio importante para definir a espessura mínima do corpo de prova.

De modo geral, a espessura mínima do corpo de prova deve ser 17 vezes a profundidade atingida pelo penetrador.

Entretanto, não há meios de medir a profundidade exata atingida pelo penetrador no ensaio de dureza Rockwell.

possível obter a medida aproximada desta profundidade (P), a partir do valor de dureza indicado na escala da máquina de ensaio, utilizando as fórmulas a seguir: \

Penetrador de diamante:

$$\text{HR normal:} \quad P = 0,002 \times (100 - \text{HR}) \quad (7.)$$

$$\text{HR superficial:} \quad P = 0,001 \times (100 - \text{HR}) \quad (8.)$$

Penetrador esférico:

$$\text{HR normal:} \quad P = 0,002 \times (130 - \text{HR}) \quad (9.)$$

$$\text{HR superficial:} \quad P = 0,001 \times (100 - \text{HR}) \quad (10.)$$

2.4. Tribologia

A Tribologia é a parte da ciência aplicada que estuda o atrito, desgaste e lubrificação em suas diversas manifestações. Foi definida em 1966 como "a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas relacionados". Ela engloba o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação.

Nos estudos na área de tribologia não existe uma definição exata para o atrito, e ele pode ser considerado como sendo a resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contato paralela à superfície que os separa.

Um dos principais focos da tribologia é o desgaste. Os principais tipos de desgaste são: desgaste adesivo; desgaste abrasivo; fadiga e desgaste corrosivo.

O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar ocasionando a geração de um terceiro corpo e a uma transferência de material. No desgaste abrasivo ocorre a remoção de material da superfície. Esse desgaste é derivado do formato e da dureza dos dois materiais em contato. O desgaste por fadiga é ocasionado pelo alto número de ciclos (repetições do movimento). E, o desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos no qual ocorrem interações químicas e eletroquímicas ocasionando reações que geram produtos. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.

A lubrificação hidrodinâmica também é considerada uma das áreas mais importantes da tribologia, além do atrito e do desgaste. Este tipo de lubrificação ocorre quando duas superfícies em movimento relativo são separadas por uma película de um fluido lubrificante. Sua conceituação e caracterização é atribuída a três pesquisadores: Nicolai Petrov (1836-1920), Beauchamp Tower (1845-1904) e Osborne Reynolds (1842-1912). Eles perceberam que o mecanismo que existe neste tipo de lubrificação não era devido à interação mecânica de superfícies sólidas, como se acreditava na época, mas sim devido ao filme de fluido que as separava - este é o aspecto fundamental da lubrificação hidrodinâmica. Os fundamentos teóricos e experimentais foram firmemente estabelecidos num curto período de tempo, entre 1883-1886. Todavia, foi o físico britânico Osborn Reynolds (1842 - 1912) que traduziu os resultados experimentais em linguagem matemática, desenvolvendo uma equação de derivadas parciais (também chamada de equação de Reynolds em sua homenagem) que tem sido a base para a grande maioria dos desenvolvimentos nesta área, gerando um grande número de pesquisas até os dias de hoje.

2.5. Atrito

Ao aplicar uma força em um corpo sobre uma superfície, percebemos uma certa dificuldade para colocá-lo em movimento. Essa dificuldade deve-se à força de atrito, que pode ser definida como a força que se opõe ao movimento, de superfícies que estão em contato sob a ação de uma força e animadas de movimento relativo. Essa força age paralelamente à superfície de contato e em sentido contrário à força aplicada sobre um corpo. Ela depende da natureza e da rugosidade da superfície, é proporcional à força normal de cada corpo e, transforma a energia cinética do corpo em outro tipo de energia que é liberada no meio.

A força de atrito deve-se a existência de rugosidades na superfície de contato do objeto com o solo. Essas rugosidades não são observadas macroscopicamente, mas são elas que dificultam o movimento.

A Figura 3 mostra esquema de um corpo deslizando com atrito.

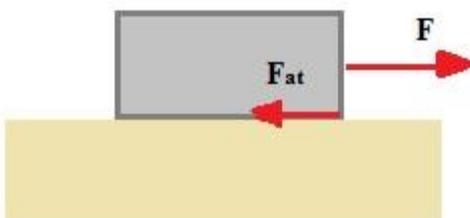


Figura 3: Ilustração esquemática de um corpo deslizando sobre uma superfície (MUNDO EDUCAÇÃO, 2018).

De acordo com a Figura 3, tem-se:

F: Força

F_{at}: força de atrito

A força de atrito é calculada pela seguinte relação:

$$F_a = \mu \times N \quad (11.)$$

Onde:

μ : coeficiente de atrito (adimensional)

N: força normal (N)

Como pode-se observar ela depende de dois fatores:

- Do tipo dos materiais que estão em contato: cada material tem suas características próprias. Quanto menos rugosas as superfícies em contato, ou seja, quanto mais lisas, menor é a força de atrito. Essa propriedade é definida numericamente pelo coeficiente de atrito (μ), que pode ser dinâmico ou estático, possuindo um valor diferente para cada material.
- Força normal: trata-se da reação normal à superfície sobre o qual o corpo está apoiado e depende do peso do objeto. Quanto maior for a força normal, maior será a força de atrito.

Existem dois tipos de coeficiente de atrito: o estático que é relacionado com a resistência para o início do movimento, e o cinético ou dinâmico, que expressa a resistência à continuidade do movimento relativo após este ser estabelecido (BLAU, 2001).

O atrito dinâmico sempre será menor do que o atrito estático máximo. Isso se deve ao fato de que o coeficiente de atrito estático é maior do que o coeficiente de atrito dinâmico. Ou seja, para colocar um objeto em movimento é preciso fazer mais força do que para mantê-lo em movimento.

Todavia, existem diversos sistemas que não obedecem às leis do atrito. Isso se deve à não consideração da natureza dissipativa da força de atrito. Assim como o atrito, o coeficiente de atrito não é uma propriedade do material, e sim uma resposta do sistema. Dessa forma, inúmeras variáveis podem afetar o coeficiente de atrito (BLAU, 2009).

Como a energia pode ser dissipada em diversas formas, dois pares deslizantes com o mesmo coeficiente de atrito podem ter taxas de desgaste muito diferentes, pois a energia é dividida de forma diferente (BLAU, 1998). Assim, a avaliação do coeficiente de atrito de forma isolada não fornece uma descrição confiável do que realmente está acontecendo no contato.

2.6. Mecânica do Contato

A mecânica do contato é definida como o estudo da deformação de sólidos que se tocam em um ou mais pontos. (JOHNSON, 1994; POPV, 2010).

Quando duas superfícies paralelas e planas são colocadas juntas, o contato irá ocorrer somente em alguns pontos. Na medida em que a carga normal é aumentada, as superfícies aproximam-se mais e um grande número de asperidades nas duas superfícies entra em contato.

Estas asperidades determinam somente os pontos nos quais as superfícies se tocam, e são responsáveis por suportar a carga normal sobre a superfície e por gerar forças de atrito que atuam entre elas. Se uma corrente elétrica passa de uma superfície para a outra, por exemplo, então ela deve passar através dos pontos de contato.

A compreensão da forma na qual as asperidades de duas superfícies interagem sob variação de cargas é, portanto, essencial para qualquer estudo de atrito, desgaste ou resistência de contato elétrico.

Os princípios da mecânica do contato podem ser aplicados em áreas como o contato rod-trilho, sistemas de frenagem, rolamentos, dispositivos de acoplamento, dentre outros.

2.6.1. Teoria de Hertz

Em 1882, Hertz foi o pioneiro na análise de tensões e deformações entre dois corpos sólidos em contato.

Ele estudou o crescimento da área de contato como uma função da força normal N aplicada, baseado num modelo elástico linear. Utilizando duas lentes de vidro em contato, Hertz notou uma franja de interferência entre as lentes e, concluiu que o raio de contato " r_c " proporcional à força normal aplicada elevada à potência $1/3$, sendo consistente com os resultados analíticos que derivou baseado no modelo elástico-linear.

Nas soluções de problemas de contato realizadas por Hertz foram determinadas algumas simplificações:

- As deformações são pequenas e são restringidas pelo limite elástico;
- As superfícies em contato são contínuas e não conformes, ou seja, a área real é muito menor do que as dimensões características dos corpos em contato;
- Cada corpo pode ser considerado um semi-espaço elástico;
- O contato entre as superfícies é livre de atrito.

Apesar destas considerações, a teoria de Hertz é diversas vezes aplicada em sistemas que envolvem plasticidade e atrito e obter resultados satisfatórios. Casos em que o coeficiente de atrito seja relativamente pequeno, menor que 0,3.

2.7. Fenômeno *Shakedown*

Como pode-se observar na Figura 4, o fenômeno *shakedown* ocorre acima do limite elástico do material. Pode ser definido como um fenômeno plástico associado a mudança de propriedade do material, no qual o material se deforma quando solicitado acima do limite de escoamento gerando tensões residuais e encruamento.

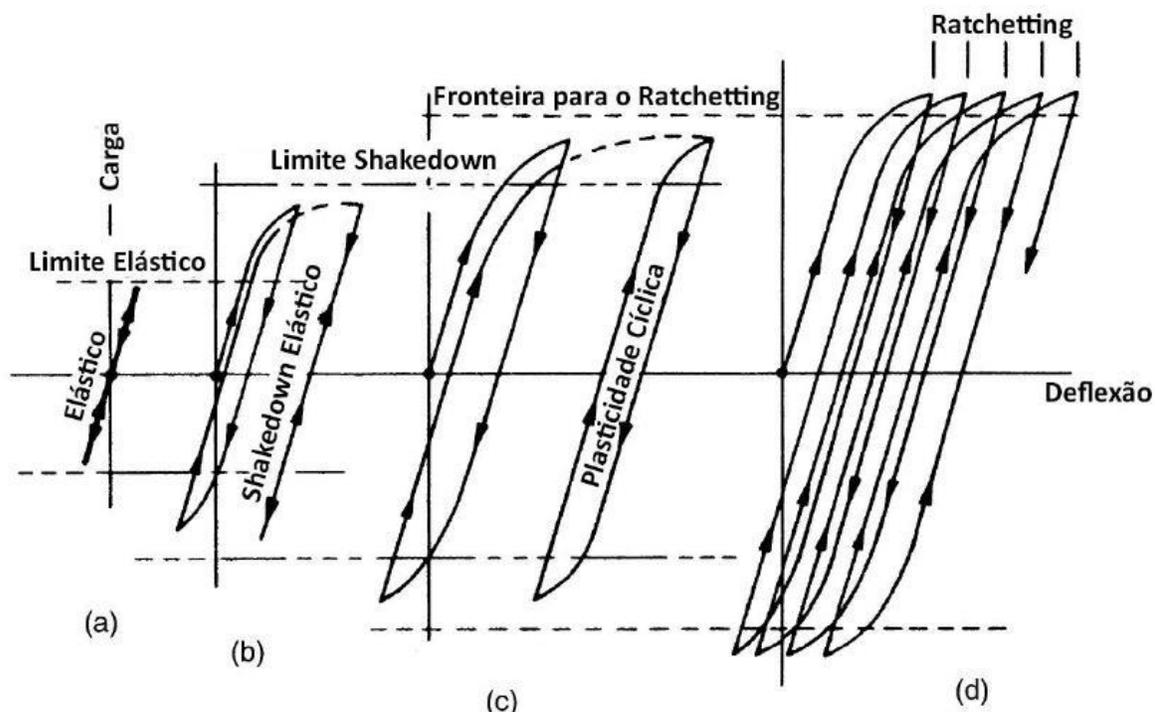


Figura 4: Diferentes formas de resposta ao carregamento cíclico: (a) perfeitamente elástica, (b) shakedown, (c) plasticidade cíclica, (d) ratchetting. (WILLIAMS, 2005).

O conceito *shakedown* pode ser aplicado a materiais metálicos sólidos que estão submetidos a cargas cíclicas ou a materiais policristalinos sob carga cíclica.

Logo, *shakedown* é o nome do efeito da transição do comportamento do material que ao ser submetido a carregamentos cíclicos, inicialmente responde plasticamente, e após uma determinada quantidade de ciclos de carregamento passam a responder de forma perfeitamente elástica.

Muitos contatos demonstram evidências de deformação plástica sob a ação de cargas repetitivas e podem sofrer o processo de *shakedown*. O real comportamento desses contatos é complexo. A primeira passagem de um carregamento que exceda o limite elástico do material de um ou de ambos os corpos em contato dá origem a três efeitos separados. Cada efeito tende a

inibir a deformação plástica em ciclos de carregamento subsequentes e contribuem para o acontecimento do *shakedown*.

Os efeitos causados pelo excesso do limite elástico do material são: introdução de tensões residuais; encruamento do material e mudança da área de contato, possibilitando uma redução da pressão de contato.

A repetição de um carregamento que exceda o limite de carga para ocasionar o efeito *shakedown*, “limite *shakedown*”, causará repetida deformação plástica no estado estacionário.

O atrito é outro fator que influencia no acontecimento ou não do *shakedown*. No geral, quanto maior o coeficiente de atrito, menor o limite *shakedown* de um tribossistema.

Acima do limite *shakedown*, como podemos observar na Figura 4, o material pode apresentar duas respostas, a plasticidade cíclica e a plasticidade incremental, conhecida também como *ratchetting*.

No primeiro caso o material fica submetido a um ciclo fechado de deformação plástica no regime estacionário. Não há incremento líquido de deformação plástica entre os ciclos de carregamento devido ao recobrimento de material que ainda não atingiu seu limite elástico. Esse recobrimento atua impedindo o crescimento de deformação plástica entre os ciclos de carregamento e faz com que a região mais solicitada fique submetida a um ciclo fechado de deformações plásticas. Esses materiais geralmente falham por fadiga de baixo ciclo.

No segundo caso, conhecido como *ratchetting*, o início do escoamento acontece na superfície, de forma que ela estaria “livre” para acumular deformação plástica a cada ciclo de carregamento. Neste caso o material nucleia prematuramente algum defeito ou falha por esgotamento plástico, o que faz com que essa condição seja mais severa do que a primeira (GONÇALVES, P. R., 2017).

3. METODOLOGIA

3.1. Preparação da Amostra

A preparação da amostra e os testes realizados foram realizados do LTM - Laboratório de Tribologia e Materiais, na Universidade Federal de Uberlândia, campus Santa Mônica.

A qualidade e as condições da amostra recebida para análise são de extrema importância. Se as amostras forem coletadas de maneira inapropriada os resultados do

laboratório não terão validade. Este procedimento se resume na preparação do corpo de prova para conseqüente análise microscópica da resposta do material quando submetido a determinado esforço cíclico.

O objeto de estudo consiste em um corpo de prova de Aço ABNT1020, não embutido, pois as dimensões da superfície a analisar eram suficientemente grandes a ponto de não ser necessário o embutimento.

3.1.1. Lixamento

Devido ao grau de perfeição requerido no acabamento da amostra para a análise, é essencial que essa etapa seja realizada de forma cautelosa. Essa operação tem como finalidade eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, dando um acabamento inicial e preparando-a para o polimento.

Foi realizada a técnica de lixamento manual, que consiste em lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando de direção (90°) em cada lixa subsequente até o desaparecimento dos traços da lixa anterior. Procedimento realizado com água.

A lixa consiste em uma folha com material abrasivo com o objetivo de dar abrasão à peça, sendo necessário variar a granulação da mesma para melhorar o acabamento e reduzir a rugosidade superficial da mesma. Quanto maior o número da lixa mais fina será a mesma, ou seja, menor os grãos abrasivos.

A sequência de lixas para o trabalho com a amostra do aço 1020 foi 80, 220, 320, 500, 1000 e 1200.

3.1.2. Polimento

Operação após o lixamento que visa um acabamento superficial polido e livre de marcas, e para este fim foi utilizado a pasta de polimento de óxido de cromo.

Antes de realizar o polimento foi realizada uma limpeza na superfície da amostra por lavagem com álcool etílico para deixá-la isenta de traços abrasivos e poeira.

Foi realizado o polimento mecânico manual através de uma Politriz. A amostra foi trabalhada manualmente no disco de polimento com pressão de trabalho um pouco maior que o peso da amostra com movimento inverso ao do movimento do disco.

Após o polimento foi realizada a limpeza da amostra em acetona.

3.2. Equipamento de teste – Indentador Instrumentado

Foi realizado testes de indentação para observar a resposta do material quando submetido a esforços cíclicos com alguns parâmetros fixos como: carga aplicada, velocidade de aplicação da carga, tempo de permanência de carga e tempo de ciclo.

O teste de indentação instrumentada tem a finalidade de investigar as propriedades mecânicas de pequenos volumes de material, proporcionando o mapeamento da distribuição espacial das propriedades mecânicas da superfície com uma boa resolução. O teste consiste em um atuador de alta resolução para forçar um indentador em uma superfície de ensaio e um sensor de alta resolução para medir continuamente a penetração resultante. A Figura 5 mostra o microtribômetro utilizado no ensaio.

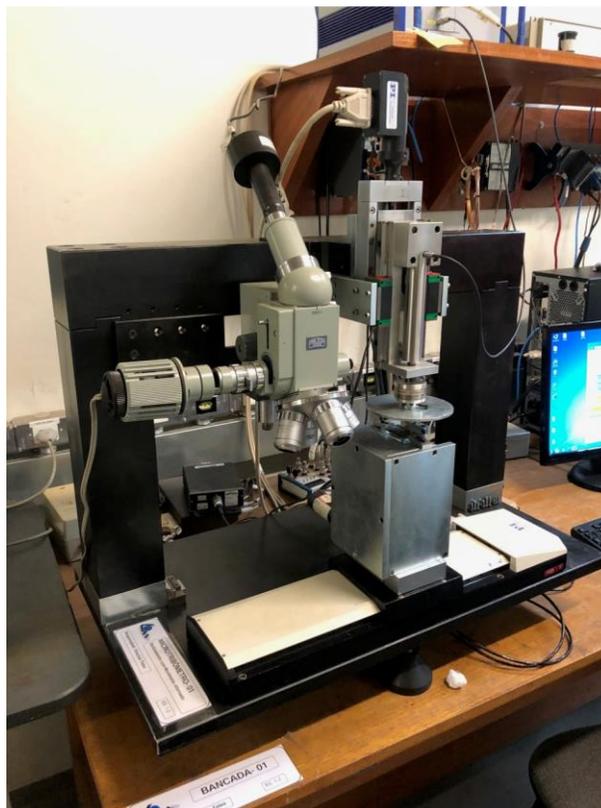


Figura 5: Indentador Instrumentado – Imagem do equipamento.

O Indentador Instrumentado é composto de três mesas coordenadoras, que permitem a movimentação da amostra no plano horizontal e a movimentação do indentador no plano vertical.

Um dispositivo controlador que gerencia as mesas coordenadoras e se comunica com o computador através de uma interface de barramento de propósito geral (GPIB padrão ANSI/IEEE 488.2). Em conjunto com a mesa que movimenta o indentador, eixo z, está associado um sistema de translação piezelétrico (PZT) modelo P-216.80, que se movimenta em uma única direção por um percurso de 120 μm com resolução de 2,4 nm.

O controle desse sistema piezelétrico é analógico e a comunicação entre o PZT e o computador é realizada via interface analógica-digital. A célula de carga tridimensional é analógica com fundo de escala de 120 N e resolução de 0,02 N na direção Z e 40 N e resolução de 0,002 N nas direções X e Y. A célula de carga se comunica com o computador através de uma placa de comunicação analógica-digital (AD/DA). O sistema de medição de posição é composto de um sensor SKF modelo CMSS 665 e um anteparo de aço ABNT 4140. O sensor possui range de 2 mm e sensibilidade, com anteparo de aço ABNT 4140, de 3,3 mV/ μm . O sensor de posição é fixo ao suporte da amostra e mede, de forma contínua, a posição relativa do anteparo em relação à ponta do sensor, como mostra o esquema da Figura 6.

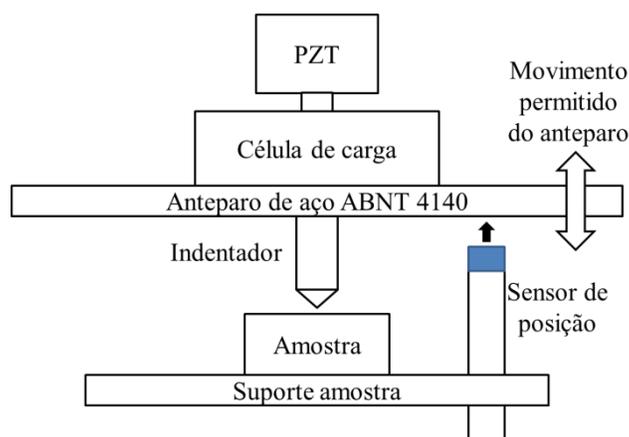


Figura 6: Esquema do sistema de medição de posição.

O programa utilizado para controlar a movimentação da amostra e do indentador, bem como para aquisição das informações fornecidas pela célula de carga foi desenvolvido na plataforma LabView®.

No teste em questão foram utilizados dois indentadores, o indentador Rockwell e o indentador Vickers com cargas de 0,5N e 1N, para comparação da resposta do material conforme o esforço submetido.

3.2.1. Dureza Vickers

Nesse método é usada uma pirâmide de diamante com ângulo de diedro de 136° que é comprimida com uma força arbitrária “F”, contra a superfície do material. Calcula-se a área “A” da superfície impressa pela medição das suas diagonais (SENAI, 2016).

A Figura 7 é uma representação do Penetrador Vickers.

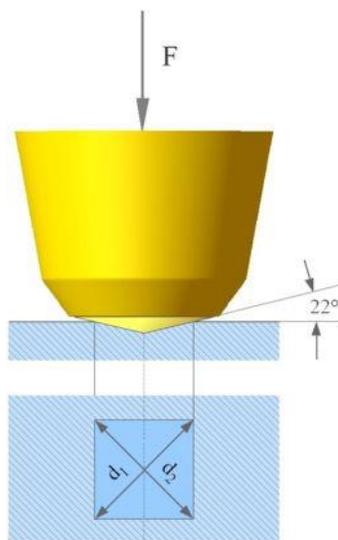


Figura 7: Penetrador Vickers (WIKIPEDIA, 2016).

3.2.2. Dureza Rockwell - C

Os penetradores incluem esferas fabricadas em aço de elevada dureza, com diâmetros de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 polegada, assim como cones de diamante, utilizados nos materiais de elevada dureza.

Neste sistema, a dureza é obtida através da diferença entre a profundidade de penetração resultante da aplicação de uma pequena carga, seguida por outra de maior intensidade (SENAI, 2018).

A Figura 8 é uma representação do penetrador Rockwell.

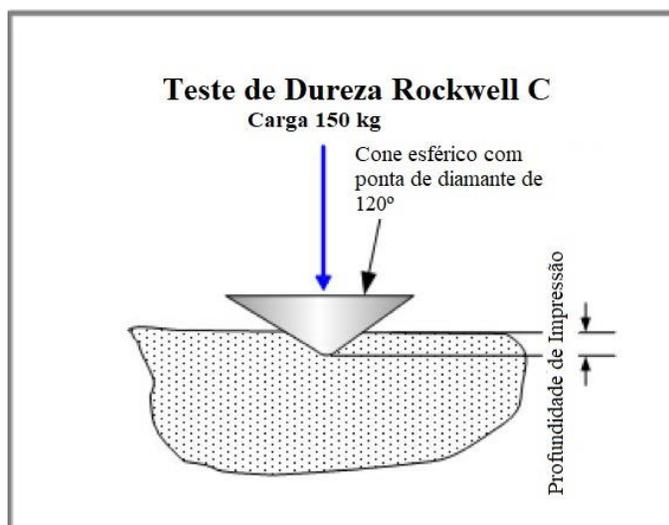


Figura 8: Penetrador Rockwell (SENAI, 2018).

3.3. Programa de controle do equipamento – LabVIEW®

O sistema foi programado utilizando a plataforma *LabVIEW®* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), que é uma linguagem de programação gráfica da empresa *National Instruments* utilizado para medições e automação.

A Figura 9 é a representação do Painel Frontal do programa em LabView®.

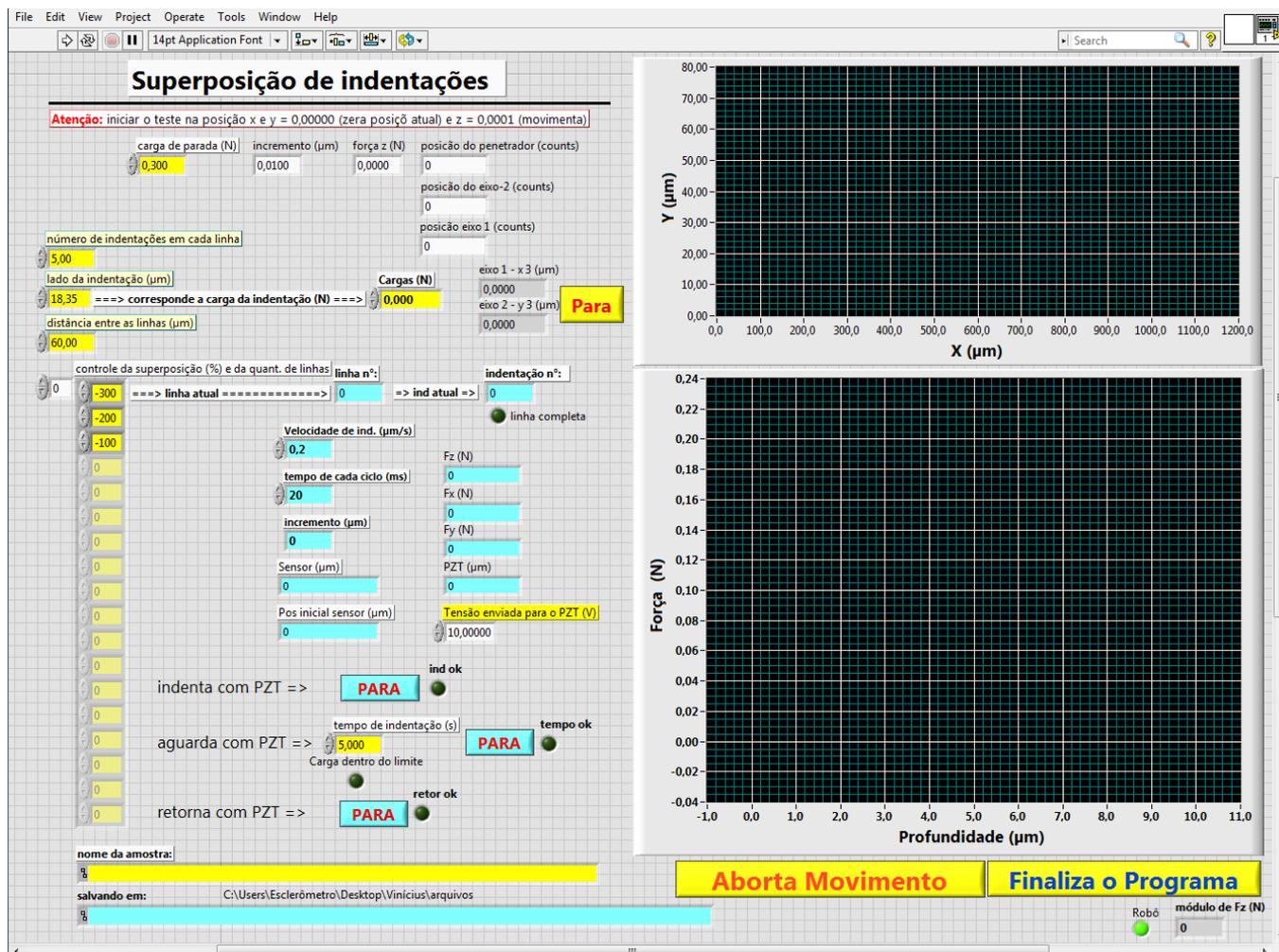


Figura 9: Painel Frontal do Programa em LabView®.

3.4. Parâmetros de teste

Após a devida preparação do corpo de prova, lixamento e polimento, a amostra foi submetida a testes de indentação com 5 superposições de indentações afim de obter uma média da resposta, reduzindo o efeito dos erros acidentais.

Foi modificado somente o parâmetro tipo de penetrador (Vickers, Rockwell-C) e a carga em cada teste (0,5 e 1 N). Os outros parâmetros foram fixados (velocidade de aplicação de carga, tempo de ciclo e tempo de permanência de carga).

A fim de analisar o comportamento do material e observar o efeito *shakedown* foram realizados cinco ciclos de carregamento, ou seja, em cada teste foi realizada a superposição de 5 indentações no mesmo ponto para posterior análise microscópica da microestrutura após sofrer o esforço cíclico.

Parâmetros de teste:

- Velocidade de aplicação de carga $V=0,2 \mu\text{m/s}$;
- Tempo de ciclo $t_c=20\text{ms}$;
- Tempo de permanência de carga $t_{pc}=5\text{s}$;
- Repetição = 5 ciclos na mesma posição.

4. RESULTADOS

Foi analisado o comportamento do material após sofrer um esforço, e, por conseguinte, analisou-se a resposta do material quando aplicado superposição de indentações em um mesmo ponto, observando as tensões residuais geradas no ensaio.

4.1. Força em função do deslocamento do indentador

Com os parâmetros de teste descritos na Metodologia, penetrador Vickers e carga aplicada de $F=0,5N$, resulta-se no gráfico da Figura 10:

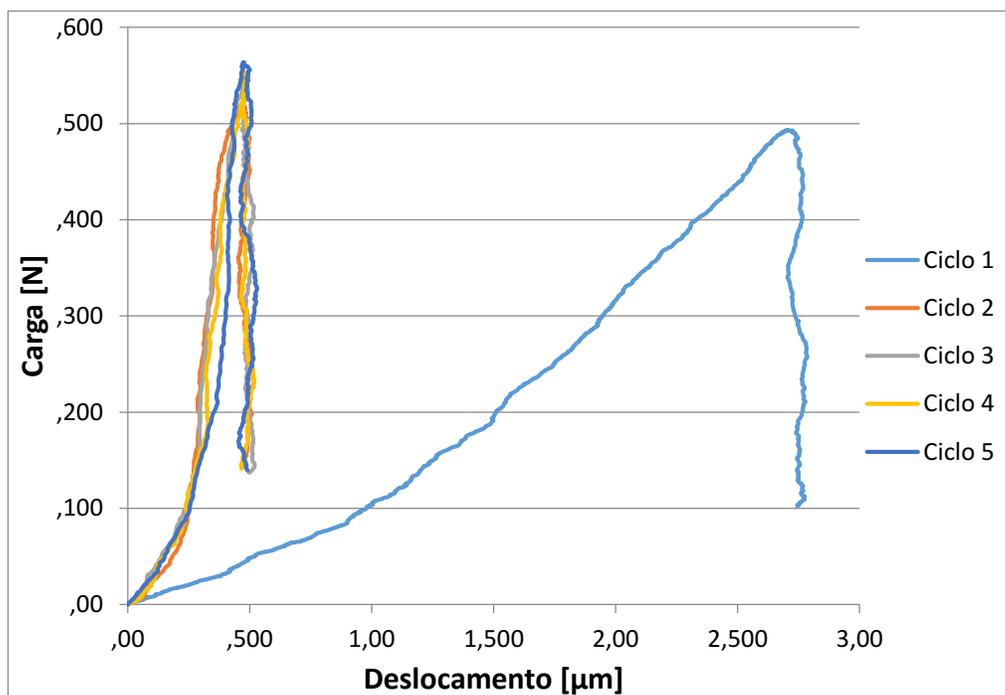


Figura 10: Carga x Deslocamento - Vickers 0,5N.

De acordo com a Figura 10, observa-se que depois de sofrer o primeiro esforço, a curva P_xh desloca-se para a esquerda, pois o material está mais encruado, ou seja, mais duro.

Um estado praticamente estacionário de deformações elasto-plásticas a partir do segundo ciclo de indentações é observado devido ao encruamento da microestrutura e maior

capacidade de absorver os impactos. No primeiro ciclo, a amostra sofre um deslocamento de 2,7 μm quando aplicada a carga de 0,5N, visto que nos outros ciclos o deslocamento foi de 0,5 μm .

Observa-se que o material sofre tensões residuais, (endurecimento por deformação), entretanto não atinge seu estado estacionário totalmente elástico, ou seja, após o descarregamento ele não se recupera totalmente da deformação sofrida.

A partir do segundo ciclo de indentação o metal deforma-se bem menos no que no primeiro ciclo. Isso acontece devido à restrição ao movimento na estrutura cristalina em que a deformação plástica realizada abaixo da temperatura de recristalização resultará no aumento da densidade de movimentação de discordâncias na estrutura cristalina e conseqüente aumento de resistência do metal. Ou seja, a deformação plástica resulta em um aumento da rigidez do material (resistência à tração).

Logo, a partir do segundo ciclo com uma carga de 0,5N observa-se uma resposta de plasticidade cíclica, na qual o material está submetido a um ciclo fechado de deformação plástica no regime estacionário, não havendo incremento líquido de deformação plástica entre os ciclos de carregamento.

Abaixo, na Figura 11, tem-se as curvas de Carga x Deslocamento para o penetrador Vickers de carga aplicada de $F=1\text{N}$.

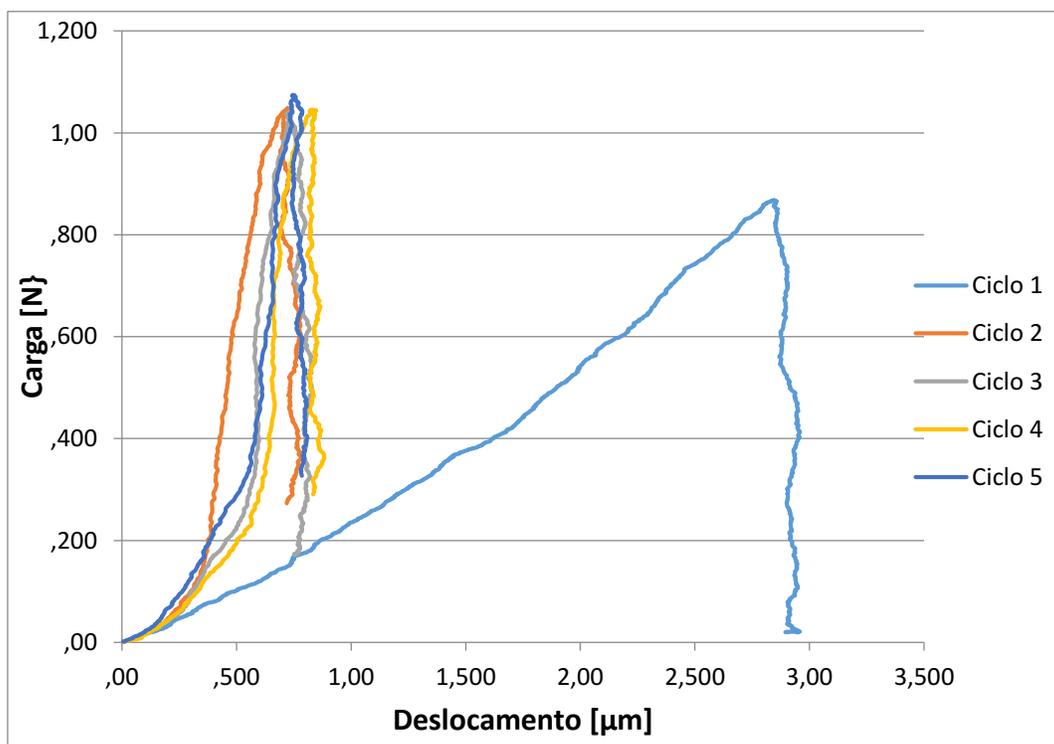


Figura 11: Carga x Deslocamento - Vickers 1N.

De acordo com a Figura 11, observa-se que a amostra sofre um deslocamento de $2,8 \mu\text{m}$ quando aplicada a carga de 1N , sendo que a partir do segundo ciclo seu deslocamento não passa de $1 \mu\text{m}$.

A resposta do teste Vickers de 1N foi semelhante ao teste com carga de $0,5\text{N}$, porém com maior deslocamento sofrido em todos os ciclos por ter carga de aplicação maior.

Não foi observado o fenômeno shakedown no ensaio Vickers para as cargas de $0,5\text{N}$ e 1N , sendo necessário maior número de ciclos de superposições para essas cargas, ou aplicar uma carga superior a esse valor.

Já na Figura 12, tem-se o resultado da curva de Carga x Deslocamento para o penetrador Rockwell-C e carga de aplicação de $F=0,5\text{N}$.

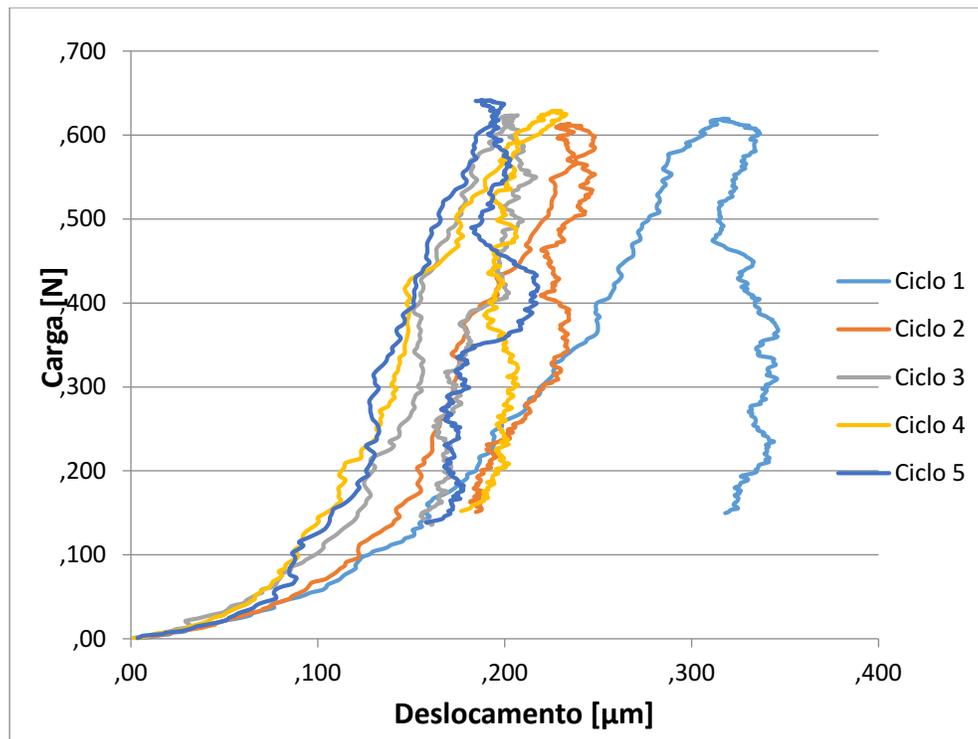


Figura 12: Carga x Deslocamento – Rockwell-C 0,5N.

De acordo com a Figura 12, observa-se a amostra sofre um deslocamento de $0,3 \mu\text{m}$ no primeiro ciclo, e a partir do segundo ciclo seu deslocamento é cada vez menor.

Ao utilizar o indentador Rockwell e uma carga de $0,5\text{N}$, o deslocamento sofrido em comparação com o indentador Vickers $0,5\text{N}$ foi bem menor. Isso ocorre, pois, a área de contato

do indentador Rockwell é maior quando comparada ao indentador Vickers, o que faz com que a pressão aplicada seja menor [$P=F/A$], pois são grandezas inversamente proporcionais.

A amostra claramente ultrapassou seu limite elástico. A cada ciclo de indentação ela se deforma plasticamente, e a curva desloca-se para a esquerda cada vez mais, deixando a área próxima ao contato cada vez mais encruada, e por sua vez, mais resistente ao contato.

Para melhor análise do fenômeno *shakedown* com a carga de 0,5N e penetrador Rockwell-C, seria necessário maior número de repetições no mesmo ponto, pois nos 5 ciclos de superposição aplicados observa-se que o material ainda sofre incremento de deformação plástica.

Abaixo, na Figura 13, tem-se o resultado da curva de Carga x Deslocamento para o penetrador Rockwell-C e carga de aplicação de $F=1N$.

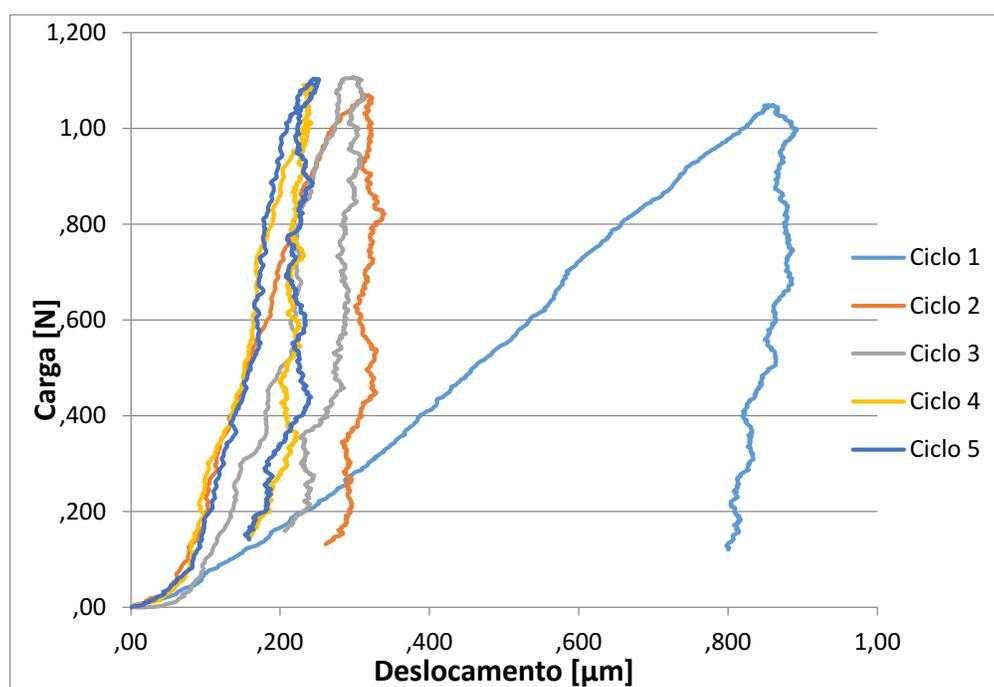


Figura 13: Carga x Deslocamento - Ensaio Rockwell-C 1N.

No primeiro ciclo, com carga de 1N e indentador Rockwell-C, o material sofre um deslocamento de 0,8μm e, a partir do segundo ciclo sofre um deslocamento bem menor, de aproximadamente 0,2μm, deslocando a curva para a esquerda. Observa-se que no ensaio Rockwell-C de 1N o material deforma mais que o ensaio Rockwell-C de 0,5N devido à maior carga aplicada.

Observa-se que a partir do segundo ciclo as curvas de deslocamento estão bem mais próximas umas das outras em comparação ao ensaio de 0,5N. Isso mostra que com maior carga de aplicação o material sofre maior encruamento e fica mais resistente à deformação.

Entretanto, o material não chegou no *shakedown* elástico. É necessário maior número de repetições dos ciclos para atingir esse regime.

A força de aplicação da carga afeta diretamente a quantidade de ciclos para chegar ao regime elástico do material, pois quanto maior a força, maior será a pressão aplicada, logo, maior o movimento de discordâncias na estrutura cristalina do material e maior a resistência à penetração.

O deslocamento sofrido também é proporcional à força de aplicação da carga, por isso o deslocamento no teste com carga de 1N foi maior do que o deslocamento sofrido com a carga de 0,5N.

4.2. Cálculo da dureza em função dos ciclos

Para análise da impressão de dureza, foi utilizado o Microscópio Olympus BX51M com ampliação total de 1000x e ampliação das fotos de 100x.

De acordo com a Figura 14 tem-se a impressão do ensaio Vickers para carga de 0,5N.

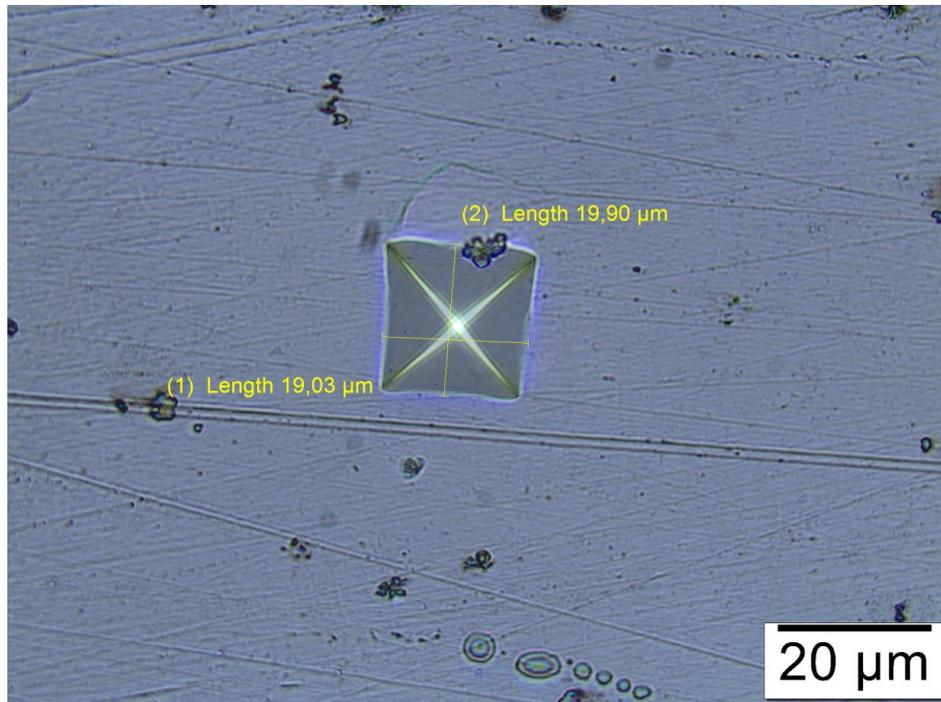


Figura 14: Impressão do Ensaio Vickers 0,5N.

Fazendo média entre os lados do quadrado temos:

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2}$$

$$l = \frac{19,90 + 19,03}{2}$$

$$l = 19,46\mu m$$

Calculando a diagonal do quadrado como:

$$l = d \times \cos(45^\circ)$$

Tem-se:

$$d = \frac{19,46}{\cos 45^\circ}$$

$$d = 27,52\mu m = 27,52 \times 10^{-3} mm$$

Calculando a dureza, e considerando que 0,5N equivalem a 0,051kgf, tem-se:

$$HV = \frac{(1,8544 F)}{d^2}$$

$$HV = \frac{1,8544 \times 0,051}{(27,52 \times 10^{-3})^2}$$

$$HV = 124,87HV$$

De acordo com a Figura 10, retira-se a profundidade de penetração de cada ciclo, para carga de aplicação de 0,5N.

De acordo com Figura 14, tem-se a área da impressão e foi calculada a dureza a partir da diagonal da área da impressão. A média dos valores encontrados para ensaio de dureza Vickers de acordo com essa diagonal foi de 123,09HV.

A dureza Vickers do aço ABNT 1020 na literatura é 126 HV. Observa-se que a média dos valores encontrados experimentalmente é bem próxima do valor teórico, sendo essa pequena diferença entre os valores possíveis erros experimentais, seja a vibração da mesa durante o ensaio, seja a própria oxidação do aço, ou sujidades presentes no corpo de prova.

A média do valor da dureza para cada ciclo pode ser vista na Figura 15 abaixo. Nesse teste foi utilizado o indentador Vickers e força de indentação de 0,5N. A dureza Vickers foi calculada de acordo com a Figura 11 de acordo com a profundidade em cada ciclo.

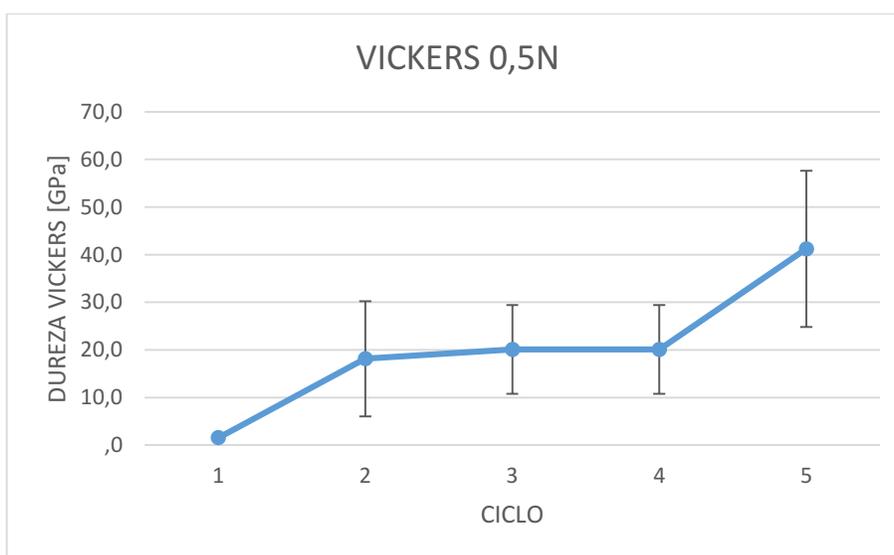


Figura 15: Ensaio Vickers - Dureza x Ciclo - 0,5N

Observa-se que há um aumento na dureza do material do primeiro para os outros ciclos devido ao encruamento. Ou seja, durante a primeira indentação o material está mais mole, e após o primeiro ciclo o material encruou, gerando um aumento da densidade de discordâncias e consequentemente aumentando a rigidez do material.

De acordo com a Figura 16 seguir, observa-se o aumento da dureza do material após o primeiro ciclo de carregamento no ensaio Vickers para carga de 1N.

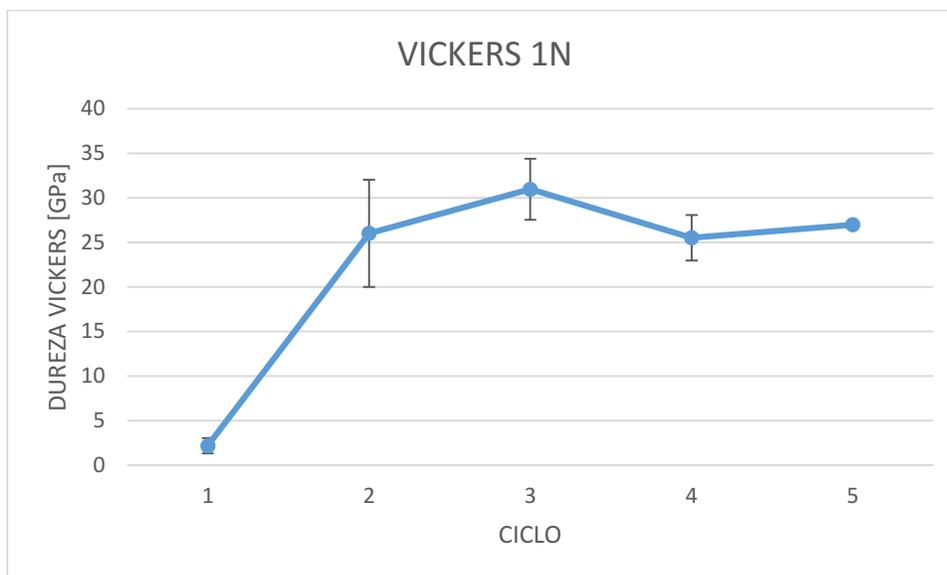


Figura 16: Ensaio Vickers - Dureza x Ciclo – 1N

A dureza Vickers calculada de acordo com a Figura 11 é calculada de acordo com a profundidade em cada ciclo. Para cada ciclo de carregamento foi calculada sua respectiva dureza afim de observar o fenômeno ocorrido após cada ciclo.

Foi observado considerável aumento na dureza após o primeiro ciclo devido ao encruamento do material, da mesma maneira que foi encontrado para a carga de 0,5N no ensaio Vickers. É observado um pequeno decréscimo na dureza no ciclo 4, porém seu desvio padrão encontra-se dentro da média encontrada para os outros ciclos. Isso significa que os valores de dureza entre o segundo e quinto ciclo são bem próximos.

Abaixo, seguem as imagens do Ensaio Rockwell C, e pode-se observar que a imagem da deformação gerada no corpo de prova não pode ser observada com clareza no microscópio óptico devido ao formato mais arredondado do indentador e a baixa carga aplicada, que ao contrário do indentador Vickers, não concentra tanta tensão em sua ponta.

Na Figura 17 encontra-se a impressão do ensaio de dureza Rockwell-C para a carga de 0,5N.

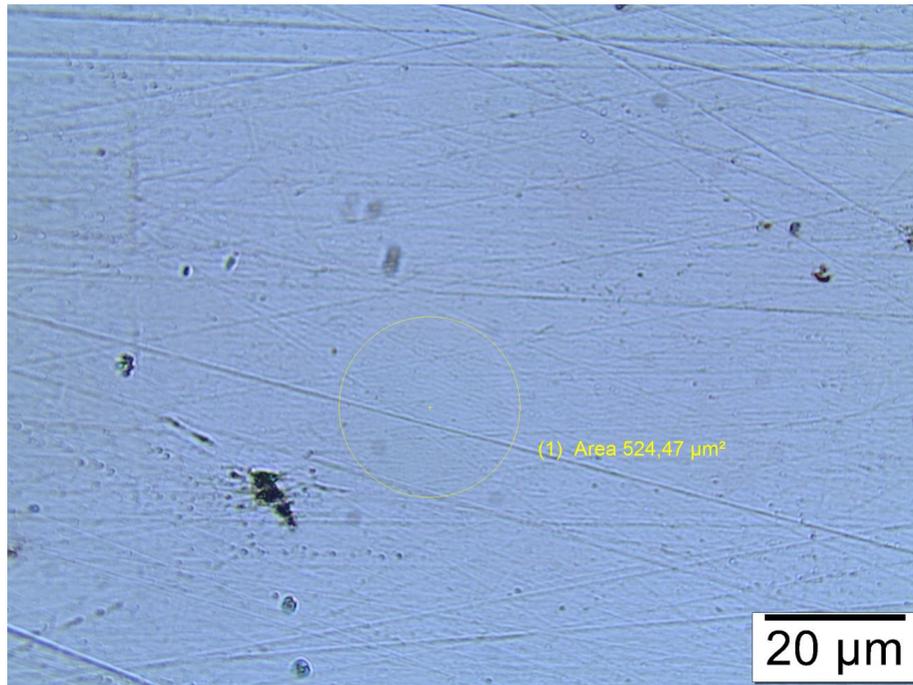


Figura 17: Impressão do Ensaio Rockwell 0,5N.

Como a dureza Rockwell não apresenta relação com a área da impressão, pegou-se a média da profundidade da penetração de cada ensaio, mostrado nos gráficos Carga x Deslocamento. E, de posse do valor da profundidade de penetração, foi calculado a Dureza Rockwell-C.

De acordo com a Figura 17 temos a profundidade de penetração de cada ciclo, para carga de aplicação de 0,5N.

- Ciclo 1: $P = 0,3\mu\text{m} = 0,00025\text{mm}$

Calculando a Dureza Rockwell-C através dessa profundidade, tem-se:

$$P = 0.002 \times (100 - HR)$$

$$HR = \frac{0,02 - P}{0,002}$$

$$HR = \frac{0,02 - 0,0003}{0,002}$$

$$HR = 8,5HRC$$

A média do valor da dureza para cada ciclo pode ser vista de acordo com o gráfico da Figura 18 abaixo. Nesse teste foi utilizado o indentador Rockwell e força de indentação de 0,5 N.

Observa-se que há uma tendência ao aumento na dureza do material a partir do segundo ciclo devido ao encruamento. A partir do segundo ciclo observa-se que o material tem praticamente o mesmo valor de dureza com um baixo desvio padrão. Isso mostra que a partir do segundo ciclo o material já se encontra encruado e com semelhante dureza e pouca deformação para a mesma carga aplicada.

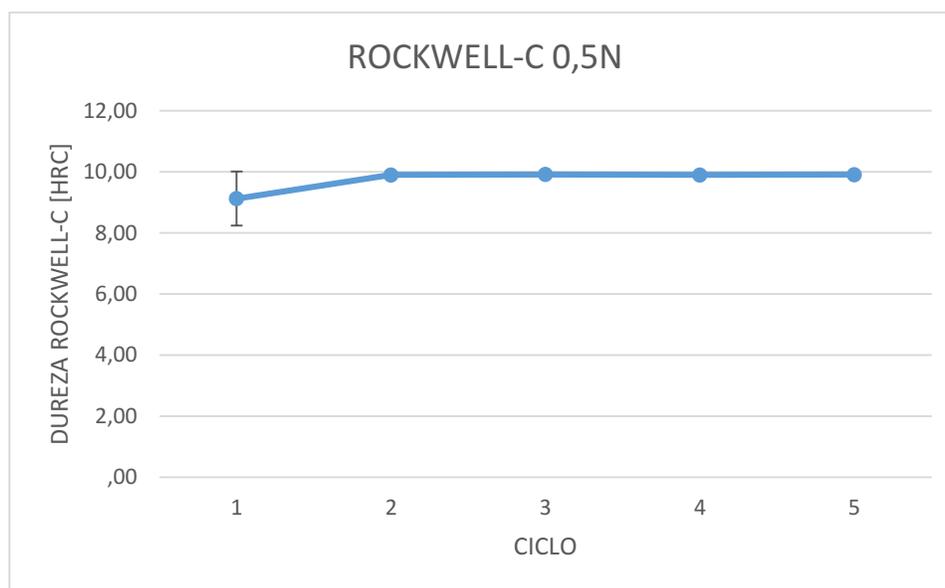


Figura 18: Ensaio Rockwell-C - Dureza x Ciclo - 0,5N.

A Figura 19 representa a média da dureza para cada ciclo ao utilizar-se o indentador Rockwell-C e uma carga de 1N.

Observa-se que em todas indentações Rockwell-C, tanto para carga de 0,5N quanto para carga de 1N a resposta do material foi semelhante. Durante a primeira indentação temos uma profundidade de penetração bem maior do que os outros ciclos, logo a priori o material ainda está “mole”. A partir da segunda indentação no mesmo ponto, o material já está encruado, aumentando a resistência à penetração, e, portanto, aumentando a dureza do material.

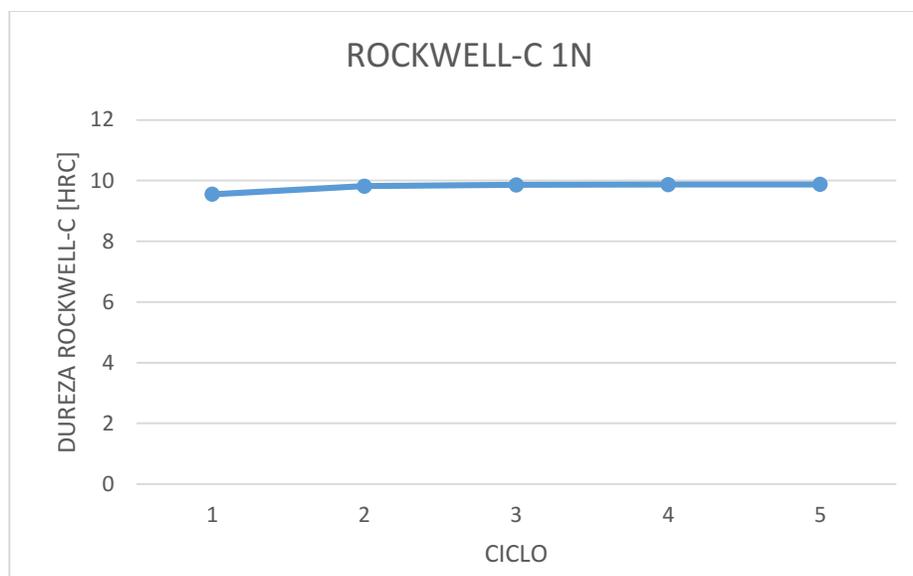


Figura 19: Ensaio Rockwell-C Dureza x Ciclo - 1N.

Como a dureza Rockwell-C é considerada válida para valores acima de 20HRC e os valores encontrados foram menores do que 10HRC, usamos esses valores apenas para comparar o aumento da resistência à penetração do material após cada ciclo de carregamento, sendo necessário usar outro tipo de indentador caso fosse necessário calcular com precisão o valor da dureza, visto que para cargas muito pequenas, como foi estabelecido neste ensaio de 0,5 e 1N, o indentador Rockwell-C não é o ideal para o ensaio.

4.3. Evolução da constante de carregamento em função dos ciclos

A inclinação das retas nos gráficos representa a resistência à penetração. Ou seja, quando maior a inclinação, maior será a resistência à penetração. Conforme cada indentação, o material fica mais encruado e por sua vez, mais resistente à penetração. Abaixo seguem as representações gráficas de cada teste realizado.

A Figura 20 representa a inclinação da curva para o ensaio Vickers de 0,5N.

O primeiro ciclo foi com menor inclinação, ou seja, menor resistência à penetração. Logo, temos uma resposta semelhante em todos os outros ciclos, com a resistência à penetração bem próxima uma da outra, devido ao encruamento do material na região da penetração.

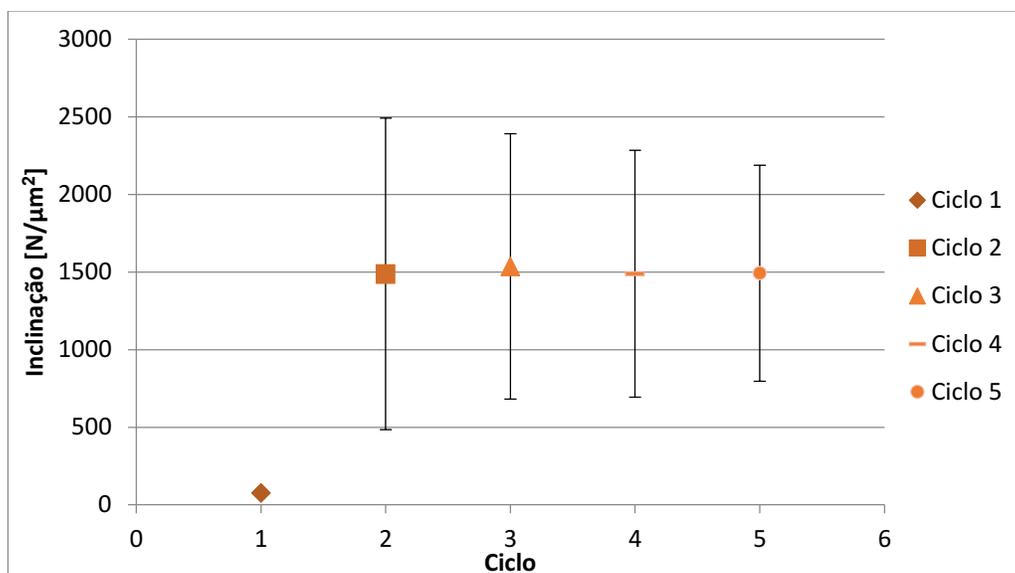


Figura 20: Inclinação Ensaio Vickers 0,5N.

A Figura 21 representa a inclinação da curva para o ensaio Vickers de 1N.

De acordo com o segundo teste, Ensaio Vickers de 1N, observa-se que a diferença entre o primeiro ciclo e os demais é bem evidente, assim como na Figura 21, ou seja, no primeiro ciclo há baixa resistência à penetração, e a partir da segunda indentação essa resistência aumenta devido ao movimento de discordâncias e conseqüente aumento da resistência causado pela primeira indentação.

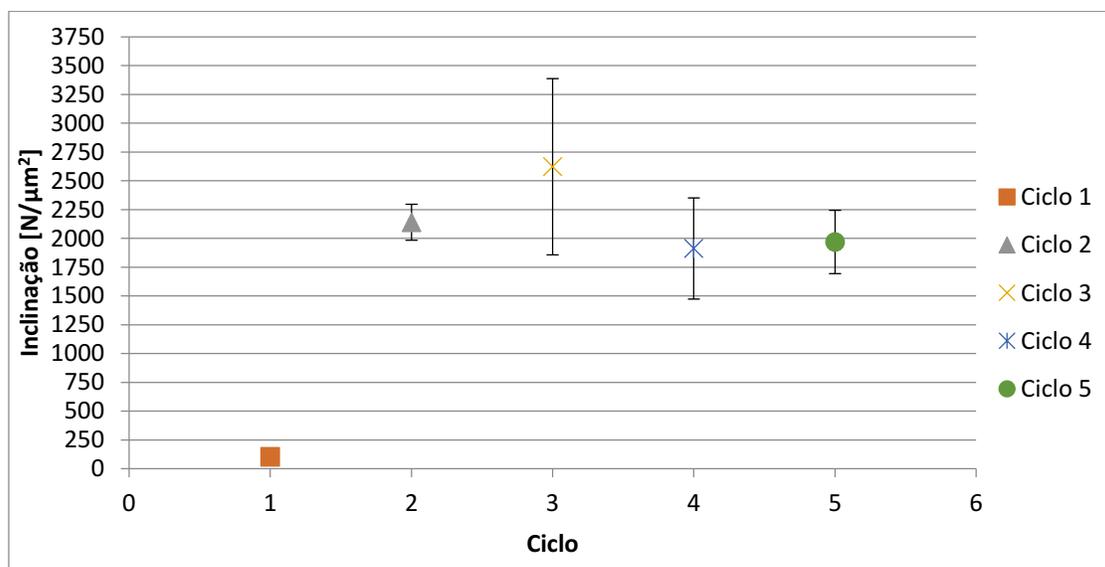


Figura 21: Inclinação Ensaio Vickers 1N.

A Figura 22 representa a inclinação da curva para o ensaio Rockwell de 0,5N.

No Ensaio Rockwell de 0,5N observamos um comportamento semelhante ao anterior (Vickers de 1N), ou seja, a partir do segundo ciclo há um aumento considerável na resistência a penetração. Entretanto com o valor da inclinação bem mais elevado, devido ao formato menos agressivo do indentador, que faz com que a resistência à penetração do indentador Rockwell seja bem mais elevado.

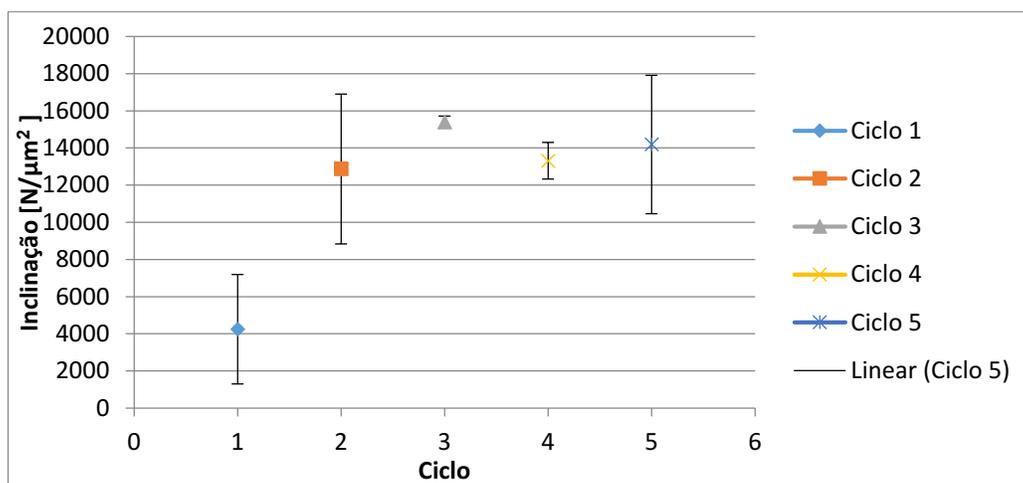


Figura 22: Inclinação Ensaio Rockwell 0,5N.

A Figura 23 representa a inclinação da curva para o ensaio Rockwell de 1N.

No ensaio Rockwell de 1N observa-se que a cada ciclo houve maior resistência à penetração devido ao aumento da resistência à deformação a cada superposição.

Ao se comparar os valores das inclinações de cada ciclo do Ensaio Rockwell 1N com o Rockwell 0,5N conclui-se que quanto maior a carga aplicada, menor é a resistência à penetração.

Resultado esperado de se obter uma vez que, quanto maior a força aplicada, maior é a pressão, pois são grandezas diretamente proporcionais.

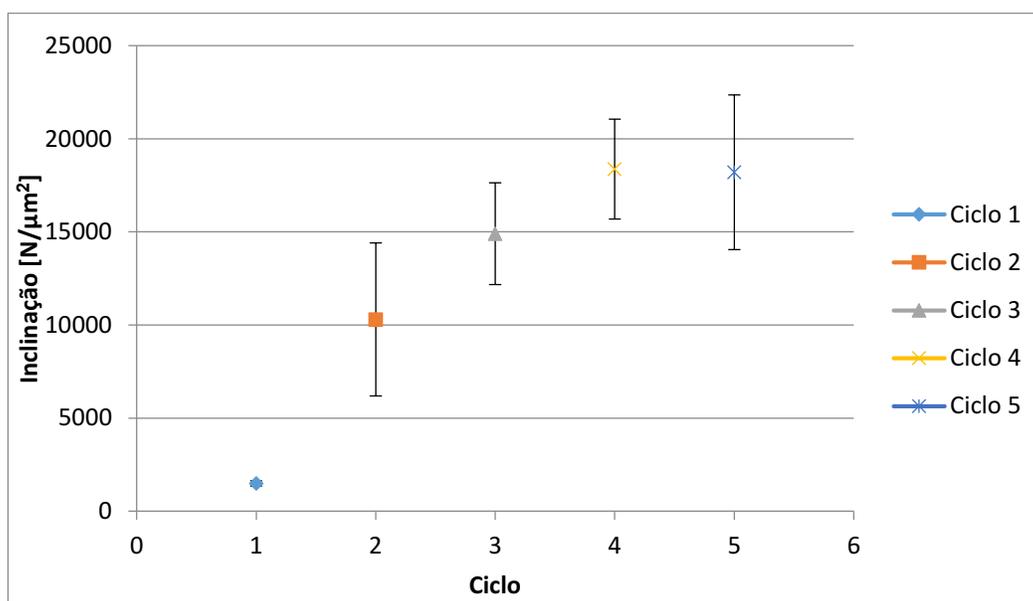


Figura 23: Inclinação Ensaio Rockwell 1N.

5. CONCLUSÕES

A deformação sofrida no material foi impulsionada pelas altas tensões normais e tangenciais provenientes do ensaio de dureza realizado utilizando o esclerômetro.

Acima do limite elástico, ocorreu deformação plástica no material solicitado, e por causa do desenvolvimento de tensões residuais, encruamento e uma possível mudança na geometria do contato, o material ficou cada vez mais resistente à deformação a cada ciclo, ficando a cada ciclo mais próximo de se alcançar, no regime estacionário, uma resposta completamente elástica, denominado *shakedown* elástico.

Não foi encontrada essa resposta completamente elástica com apenas 5 ciclos de carregamento com carga de 0,5N e 1N, sendo necessário realizar mais ciclos para que fosse observado esse fenômeno nos testes de Dureza Vickers e Dureza Rockwell C.

Todos os fatores são influenciáveis para a ocorrência do fenômeno *shakedown*. A mecânica do contato, o atrito, o tipo do penetrador, a carga atuante, o tempo de aplicação da carga, o número de ciclos, e, principalmente a microestrutura do metal.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para os trabalhos futuros recomenda-se melhorar o acabamento do material com polimento eletrolítico e analisar mais detalhadamente a microestrutura do material antes de realizar os testes de indentação.

O aço 1020 é bifásico, possui perlita e ferrita em sua estrutura, e o tamanho dos grãos influenciam no processo. Logo, com a análise da microestrutura, será possível identificar o tamanho dos grãos e identificar as duas fases do material.

BIBLIOGRAFIA

[1] DUREZA VICKERS. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2016. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Dureza_Vickers&oldid=47156094>. Acesso em 8 nov. 2016.

[2] DUREZA ROCKWELL, SENAI, Brasil, 2018.

[3] DUREZA VICKERS, SENAI, Brasil, 2018.

[4] ARAÚJO, R. I.; DIAS, A.M.S. II; GODOY, G.C.D. III, Estudo numérico da influência do coeficiente de atrito no ensaio de indentação em filmes finos. Rio de Janeiro, Brasil, jan. 2013.

[6] HEARLE, A. D. *Deformation, shakedown and fatigue in rolling contact, Ph.D. Dissertation, University of Cambridge*, 1984.

[7] BLAU, P. *Embedding wear models into friction models. Tribology Letters*, v. 34, p. 75-79, 2009.

[8] BLAU, P. Four great challenges confronting our understanding and modeling of sliding friction. *Tribology for energy conservation*. Amsterdam: Elsevier, p. 177-228, 1998.

[9] BLAU, P. *The significance and use of the friction coefficient. Tribology International*, v. 34, p. 585–591, 2001.

[10] JOHNSON, K.L. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1994.

[11] WILLIAMS, J.A. *The influence of repeated loading, residual stresses and shakedown. Tribology International*, 38, p. 786–797, 2005.

[12] GONÇALVES, P. R. Estudo Numérico de Propriedades Mecânicas e do Atrito no Fenômeno de *Shakedown*, Dissertação de Pós Graduação, Espírito Santo, Brasil, 2016. Acesso em fev. 2017.

[13] CALLISTER, W. Ciência e Engenharia de Materiais, 1985.

[14] FORÇA DE ATRITO, MUNDO EDUCAÇÃO, Brasil, 2018