

## **ANÁLISE DE DESGASTE ABRASIVO EM ROLO DO SECADOR HORIZONTAL ROTATIVO NA INDÚSTRIA CERÂMICA FABRICADO DE AÇO ABNT 1045**

**Jonata Silva Pizoni<sup>1</sup>**

**Anderson Daleffe<sup>2</sup>**

**Resumo:** Na indústria cerâmica é preciso controlar a umidade da matéria-prima, para isso utiliza-se um secador horizontal rotativo. Esse equipamento possui duas pistas acopladas no cilindro, onde se encontram dois conjuntos de acionamentos que o tracionam. Cada conjunto possui quatro rolos de aço ABNT 1045 que estão em contato com a pista, onde ocorre o desgaste do material. O objetivo deste trabalho é avaliar o desgaste abrasivo nos rolos, evitando as paradas na linha de produção e aperfeiçoar o processo produtivo. Para a validação do estudo foram fabricadas doze amostras por diferentes métodos de fabricação, sendo: sem tratamento, tratado em óleo, tratado em óleo e duplo revenido e tratado em água, onde os materiais foram submetidos à análise química, tratamento térmico, metalografia, ensaio de dureza, rugosidade superficial e ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha em areia seca (ASTM-G65). O resultado obtido pela amostra tratada em água obteve a maior resistência ao desgaste com 34,43 mm<sup>3</sup>/m e a maior dureza com 48,667 HRc, porém não se aplica no processo de fabricação do rolo. Já a amostra tratada em óleo e duplo revenido, obteve o melhor desempenho relacionado à dureza com o resultado de 17,530 Hrc. Conclui-se que para todos os fatores envolvidos nos ensaios realizados a amostra tratada em óleo e duplo revenido foi a que melhor destacou na aplicação. Em pesquisas futuras, entre as possibilidades de estudo, poderá ser abordado o processo de fabricação utilizando o tratamento térmico em água e duplo revenido para verificar a adequação deste processo.

**Palavras-chave:** Aço ABNT 1045. Desgaste Abrasivo. Metalografia. Secador Horizontal Rotativo.

### **1. INTRODUÇÃO**

Para controlar a umidade no processo de secagem da matéria-prima é utilizado um secador rotativo, na linha de produção na indústria cerâmica. O secador rotativo é uma máquina constituída entre outras partes de dois mecanismos de apoio e acionamento do rolo. Este mecanismo é composto de rolos e pista de rolagem, que trabalham em conjunto, nesta região ocorre o desgaste das peças devido ao atrito, causado pelo contato entre rolo e pista. Este desgaste prematuro pode ser

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: jonatapizoni@hotmail.com

<sup>2</sup> Prof. Dr. Anderson Daleffe. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

reduzido a níveis aceitáveis, mas para isso é necessário um estudo detalhado do processo de fabricação do rolo, da pista e dos materiais envolvidos.

O setor de secagem da matéria-prima precisa de um equipamento conhecido como secador rotativo, estes podem ser horizontais ou com uma suave inclinação, podendo operar em condições rígidas e contínuas. Os componentes mecânicos são de extrema importância para seu funcionamento, os dois conjuntos de acionamentos localizados em duas pistas trazem melhor desempenho e operação na linha de produção.

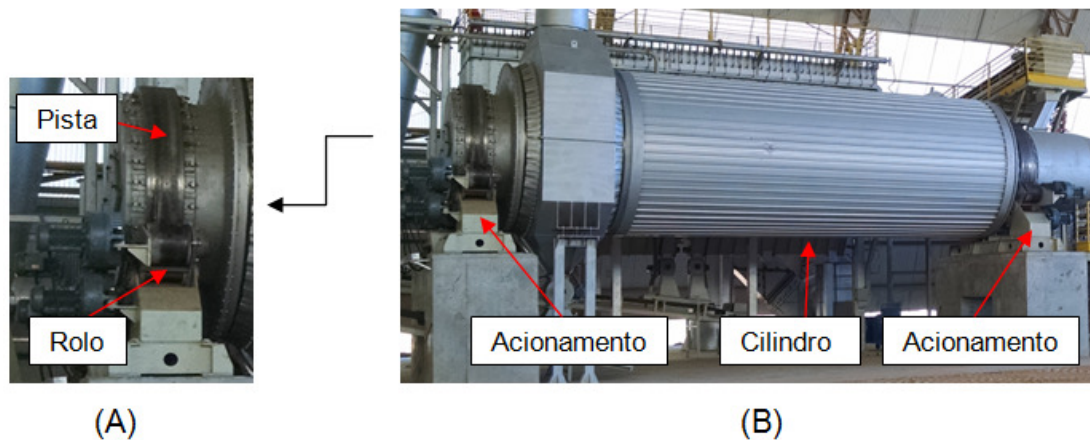
O conjunto de acionamentos é composto por duas pistas forjadas de rolagem, acopladas no cilindro que as tracionam. Em cada conjunto, se encontram quatro rolos de aço ABNT 1045, que estão em contatos com a pista, ocasionando um desgaste do material, causando uma redução na resistência mecânica, alterando o dimensionamento do componente e manutenções dos acionamentos.

O desgaste em componentes mecânicos é um problema de estudo e pesquisa nas indústrias. Por solicitação da empresa, sugeriu através do ensaio de desgaste abrasivo que analisasse o comportamento do rolo em contato com a pista, para que verificasse qual o melhor comportamento e desempenho na aplicação do equipamento. A análise e estudo dos mecanismos de desgaste e dos materiais envolvidos fornecem dados suficientes para tomada de decisão na seleção de materiais para produção e na manutenção para substituições de componentes, visando obter peças com maior rendimento. Para a indústria cerâmica, não é diferente, com as novas tecnologias, busca-se a redução de custos, através da minimização de paradas inesperadas na linha de produção.

Deve-se levar em consideração o processo de fabricação do rolo, a troca de componentes e a manutenção, ou seja, para evitar a troca, devemos ter possíveis soluções e resultados em tratamentos térmicos nas superfícies que aumentam a vida útil do rolo e que tenham um menor custo benefício e maior produtividade para a empresa.

Para melhor funcionamento dos acionamentos, visa-se obter menor desgaste dos rolos e aumentar a vida útil do conjunto que os tracionam em condição de trabalho contínuo. A Fig. 1 mostra os detalhes dos componentes citados.

Figura 1 - Processo de operação do secador e conjuntos acionamentos.



Fonte: do Autor (2019)

De acordo com a Fig. 1, são apresentados os principais elementos que compõem o secador rotativo, onde pode ser visualizado o componente que é o objeto de estudo deste trabalho. O rolo indicado na Fig. 1-A identifica o local onde sofre desgaste por atrito, causado pelo contato entre rolo e pista. O material de fabricação deste rolo é aço ABNT 1045, onde foram retirados 12 corpos de prova. Destes, três foram submetidos ao ensaio de desgaste abrasivo em condições *as received*, os outros três foram submetidos a tratamento em óleo e após foi realizado ensaio de desgaste abrasivo. Os outros três foram submetidos a tratamento em óleo e duplo revenido, e os outros três foram realizados o tratamento térmico em água, após esse procedimento foram realizado ensaio de desgaste abrasivo.

A importância deste artigo é avaliar o desgaste do material aço ABNT 1045 nos rolos do secador rotativo, evitando as paradas na linha de produção. Assim aprimorar as técnicas utilizadas para aperfeiçoar o processo, aumentando durabilidade e melhorando a qualidade do produto. O estudo será conduzido por meio de ensaios de desgaste abrasivo por roda de borracha em areia seca, conforme a norma ASTM-G65, a partir de variações de tratamentos térmicos nos corpos de prova que foram ensaiados.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta seção tem por finalidade apresentar uma revisão da literatura a respeito do desgaste recorrente nos rolos, que serão apresentadas em tópicos para um melhor entendimento deste trabalho, tais como: aço, material aço ABNT 1045, tratamento térmico, rugosidades superficiais, tipos de desgastes, desgaste abrasivo, máquina de desgaste abrasivo e norma ASTM-G65.

### **2.1 AÇO**

Uma das matérias-primas que sustenta o progresso tecnológico da humanidade seria o ferro que está presente no processo industrial, é considerado um componente fundamental em todo país. Ele se encontra na matéria básica da composição do aço e está presente na fabricação de máquinas, equipamentos para construção civil e na indústria para bens de consumo. Trata-se de um elemento com recursos minerais mais baratos e amplo espectro de aplicação em vários ramos da indústria. (Baptista, 2016).

Assunção (2010) relata que o aço possui uma importante classe de materiais metálicos usados na engenharia, obtendo uma alta combinação na característica e o bom comportamento no corte, soldabilidade, usinabilidade, boa conformação, resistência mecânica e uma relação inatingível pelo custo e benéfico das demais ligas existentes.

#### **2.1.1 Material aço ABNT 1045**

Segundo a norma NBR 172/2000, o aço ABNT 1045, é classificado como aço para construção mecânica, de carbono e especial. Deve ser considerado às exigências no estado temperado e revenido.

Segundo a norma NBR 87/2000, apresenta na estrutura do aço suas composições químicas para construção mecânica, conforme mostra a Tab. 1.

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1045.

C%	Mn%	P.máx%	S.máx%	Si%
0,43 - 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de normas técnicas (2000)

O aço ABNT 1045 é utilizado em várias aplicações, como: em eixos de bombas de torres de destilação, em eixos de ventiladores, que são aplicados nas refinarias dos setores de petróleo e gás, devido o ambiente ser agressivo, Azevedo (2002). Na Tab. 2, podemos observar as propriedades do aço ABNT 1045 Metals Handbook (1991).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045.

Temperatura de Revenido (°C)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)	Estricção (%)	Dureza Brinell (HB)
205	1132	09	33	363
260	1111	11	35	352
315	1070	09	39	341
370	1029	15	43	331
425	967	08	47	311
480	906	18	50	293
540	823	20	52	277
595	768	22	55	255
650	720	24	57	241

Fonte: Adaptado de Metals Handbook (1991)

## 2.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Os tratamentos térmicos possuem características que auxiliam na aplicabilidade do material, como: o aumento ou diminuição da dureza, melhorias na ductibilidade, o aumento da resistência mecânica, a facilidade na usinagem, a resistência à corrosão, a resistência ao desgaste, à resistência ao calor e alteração nas propriedades elétricas e magnéticas (Chiaverini, 2005).

Para Scheidemantel e Freitas (2014), o tratamento de têmpera é realizado num procedimento de aquecimento da peça num respectivo forno, chegando a uma temperatura que passa do limite superior da zona crítica, para que toda sua estrutura se transforme em austenita e rapidamente resfria em água ou em óleo. É utilizado a uma temperatura máxima ideal, tais como: elementos, porcentagem de carbono presente no aço e entre outros fatores envolvidos. Para o material aço ABNT 1045, usa-se uma temperatura de aproximadamente 900°C, ou seja, nessa

temperatura se encontra a fase austenítica e na superfície do material, não terá problemas de ocorrer a descarbonetação.

A temperatura assumida para  $A_1$  foi determinada através da Eq. 1 (Handbook, 1994).

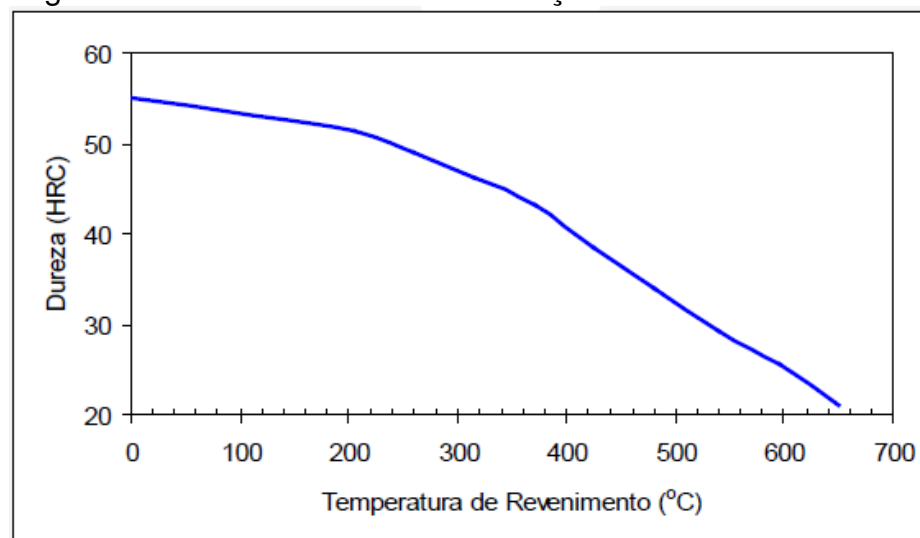
$$A_1 (\text{ }^\circ\text{C}) = 723 - 20,7(\%Mn) - 16,9(\%Ni) + 29,1(\%Si) - 16,9(\%Cr) \pm 11,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1)$$

Para a temperatura de execução do tratamento de recozimento pleno foi assumida para  $A_3$  através da Eq.2 (Handbook, 1994).

$$A_{3=} (\text{ }^\circ\text{C}) = 910 - 203 \sqrt{\%C} - 15,2(\%Ni) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo) \pm 16,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2)$$

Para determinar a temperatura de revenimento deve ser selecionada com base a dureza especificada pelo componente em análise, conforme demonstrado na Fig. 2, (Catálogo Gerdau S. A. 2019).

Figura 2 - Curva de revenimento do aço ABNT 1045.



Fonte: Catálogo Gerdau S. A. (2019)

Segundo Soares (2006), o revenimento tem como objetivo promover a difusão para atingir uma estrutura mais estável e menos frágil. O processo presente envolve a segregação do carbono em defeitos, a decomposição da austenita retida e a recristalização da estrutura martensítica.

## 2.3 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

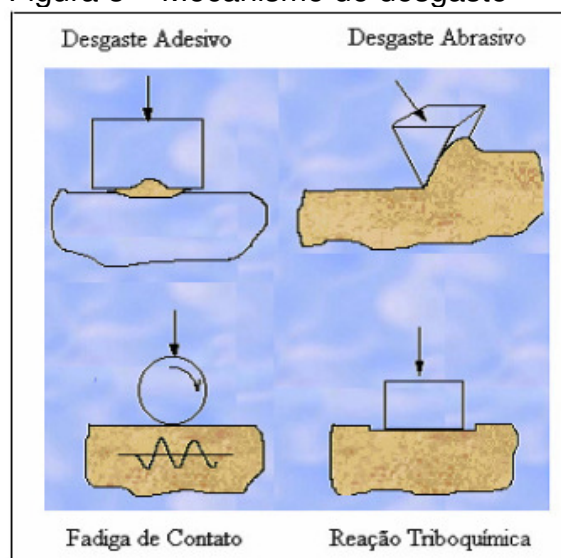
A rugosidade é um estudo de superfície que avalia o acabamento superficial do componente, onde o desgaste abrasivo está ligado diretamente ao atrito entre a superfície em que se encontra e os efeitos encontrados no estudo de ponta da tribologia (Stoeterau, 2004).

Stoeterau (2004) a medição da rugosidade de uma superfície segue os mesmos princípios de apalpadores fabricados com um material de altíssima dureza e resistente ao desgaste (ex: diamante), através de uma amplificação de mecanismos envolvidos, percorrem um comprimento total de medição emitindo um sinal de saída para o deslocamento sofrido pelo apalpador, quando aplicado sobre os vales nas superfícies da peça.

## 2.4 TIPOS DE DESGASTES

Segundo a norma DIN 50320 (1997), o desgaste pode ser dividido em quatro principais tipos de mecanismos, sendo eles: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga de superfície e desgaste por reação triboquímica, sendo o foco de estudo deste artigo o desgaste abrasivo. A Fig. 3 mostra os quatro tipos de desgastes.

Figura 3 – Mecanismo de desgaste



Fonte: Norma DIN 50320

Segundo (Kato, 2001), os mecanismos de desgaste são classificados em quatro tipos:

- Adesão: Formação e ruptura da união adesiva interfacial (exemplo: desgaste por atrito e junções soldadas a frio);
- Abrasão: Remoção de material seguindo o processo de riscamento (processo de microcorte);
- Fadiga de superfície: Fadiga e formação de trincas em regiões superficiais devido a ciclos de tensões, resultando em separações de material;
- Reações Triboquímicas: Desenvolvimento de produtos resultantes de reações químicas desenvolvidas entre o par de desgastes e o meio interfacial.

As subcategorias apresentam no sistema tribológico vários fatores integrados, como: módulo de elasticidade, dureza, tensão de escoamento, tenacidade, ductilidade, composição das superfícies, temperatura, acabamento superficial, lubrificantes, distribuição de tensão, (Zum Ghar, 1987).

#### **2.4.1 Desgaste abrasivo**

Uma das maiores preocupações nas indústrias é o desgaste de equipamentos, devido às falhas encontradas nas máquinas, fazendo com que ocorram paradas inesperadas, reposição e manutenção durante o trabalho, (Villabón e Sinatora, 2006).

Conforme Buchely (2005), estabelecer uma dureza para o material muito elevada, seria uma das maneiras mais econômica e usual, de melhoria do desempenho dos componentes expostos em condições severas de desgaste.

De acordo com Lima (2008), desgaste abrasivo é causado pelo deslocamento do material entre duas superfícies que se encontram em movimento relativo, com a presença de partículas duras ou protuberâncias.

Para Stoeterau (2004), a classificação de desgaste pura e simples não é relacionada a valores numéricos e sim dividida em desgaste leves e severos. Diante disso, o autor classificou um estudo de desgastes, conforme mostra o Tab. 3.

Tabela 3 – Classificação do desgaste.

Desgaste leve	Desgaste severo
<p>Resulta em superfícies extremamente suaves, geralmente mais suaves do que a original.</p> <p>Produz partículas extremamente pequenas, na ordem de 0,1 mm de diâmetro.</p> <p>Alta resistência elétrica de contato, pouco contato metálico real.</p>	<p>Resulta em superfícies ásperas, com ranhuras profundas, em geral muito mais rugosas do que a original.</p> <p>Produz partículas grandes, tipicamente com diâmetro médio acima de 0,01 mm.</p> <p>Baixa resistência elétrica de contato, formação de contatos metálicos.</p>

Fonte: Adaptado de Stoeterau (2004)

Segundo Stoeterau (2004), todas as superfícies sólidas possuem irregularidades, mesmo as que parecem espelhadas com uma análise em escala nanométrica. Um conjunto de rugosidades presentes na superfície do material e o aumento dessas rugosidades acabam causando o aumento do desgaste. Quanto maior a rugosidade se encontra no material, mais elevado será seu atrito e conseqüentemente se existir movimento relativo entre dois corpos, maior será a sua perda de massa.

Para Sacramento (2014), o coeficiente de desgaste “K” gerado pelas partículas abrasivas atuantes no sistema pode ser definido pela equação de Archard para desgaste abrasivo, assim podemos definir a Eq. 3.

$$\Delta Q = \frac{K * F_n * S}{H} [mm^3] \quad (3)$$

Onde:

$\Delta Q$  = Volume perdido (mm<sup>3</sup>);

K = Coeficiente do desgaste (adimensional);

F<sub>n</sub> = Carga nominal aplicada (N);

H = Dureza do material desgastado (N/mm<sup>2</sup>);

S = Distância de deslizamento linear (mm);

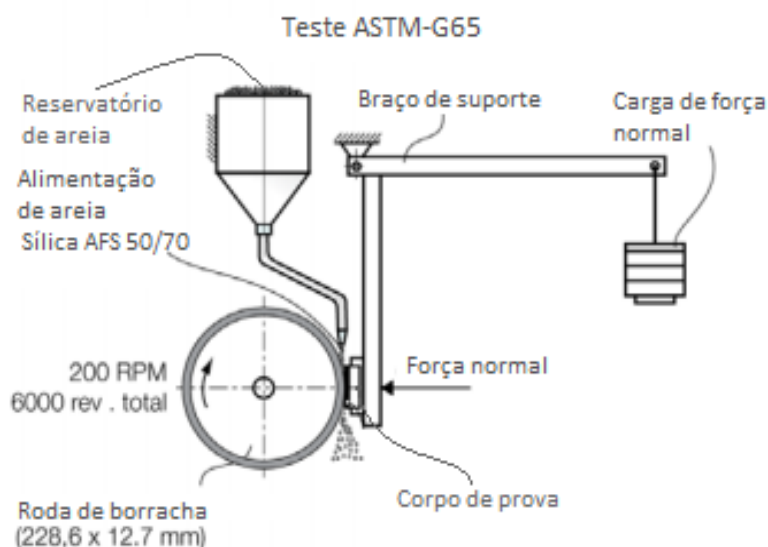
## 2.5 MÁQUINA DESGASTE ABRASIVO E NORMA ASTM G-65

Em 1948 este equipamento foi apresentado pela primeira vez pelo Haworth, (Lima, 2008), que possui um disco de aço coberto pela sua circunferência de borracha, operando em um movimento giratório entre o contato do anel de borracha com a superfície do corpo-de-prova, com a presença de abrasivo na

interface. Os ensaios realizados por este equipamento podem ser a seco ou a úmido e permite uma classificação do material quanto a sua resistência ao desgaste e possui resultados de alta confiabilidade aplicados em peças usadas na indústria de mineração tradicionalmente, (Villabón e Sinatora, 2006).

Ball (1986) relata que em superfície sólida envolvendo perda progressiva de massa devido ao movimento relativo entre a superfície e o contato com outro material ou materiais, significa que ocorre desgaste (ASTM G65-16). Quando o material é retirado da superfície por ação de partículas duras ocorre o desgaste abrasivo, isso se observa também na taxa de desgaste, que depende do grau de penetração do abrasivo na superfície do material, este por sinal que está sofrendo a abrasão. O seu princípio de funcionamento segue conforme a Fig. 4.

Figura 4 - Princípio do teste desgaste da norma ASTM-G65.



Fonte: Norma ASTM-G65 (2016)

Para Doering et al. (2011), o método padrão estabelecido pela norma ASTM-G65 serve para avaliar o desgaste abrasivo de materiais, que envolve um corpo de prova com dimensionamento retangular e uma roda de borracha com um material abrasivo de areia sílica padronizada (AFS 50/70). É colocado a areia entre a roda de borracha e o corpo de prova, a qual a roda de borracha possui um movimento de rotação a uma velocidade de 200 RPM.

Para determinar valores é necessário realizar cálculos, normalmente utilizando os dados de volume perdido no corpo de prova durante o ensaio, assim podemos definir abaixo a Eq. 4, (adaptado ASTM-G65, 2016).

$$Q = \frac{(M_i - M_f)}{\frac{\rho}{Abl}} \times 1000 \left[ \frac{mm^3}{m} \right] \quad (4)$$

Onde:

Q= Taxa volumétrica de desgaste abrasivo (mm<sup>3</sup>/m);

M<sub>i</sub>= Massa inicial (g);

M<sub>f</sub>= Massa final (g);

ρ= Densidade do material (g/cm<sup>3</sup>);

Abl= Abrasão linear;

A norma ASTM-G65 (2016), é dividida em cinco classes: materiais com revestimento, materiais de alta resistência, baixa resistência e duas elevadas taxas de perdas de volume variável. Para os procedimentos dos parâmetros de teste das classes de A á E, seria: a força aplicada no corpo de prova, o número de revoluções da roda com 228,6mm (9 pol.) de diâmetro e o fluxo de areia de 300-400 (g/min.), que deve ser seguido conforme a norma e o número de revolução a ser respeitado de acordo com os testes realizados para todos os casos.

### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Os procedimentos deste trabalho serão apresentados neste tópico, com o desenvolvimento das pesquisas e abordado com a revisão bibliográfica, sendo estes: a aquisição do material, o acompanhamento operacional e entre outros recursos que foram utilizados neste trabalho.

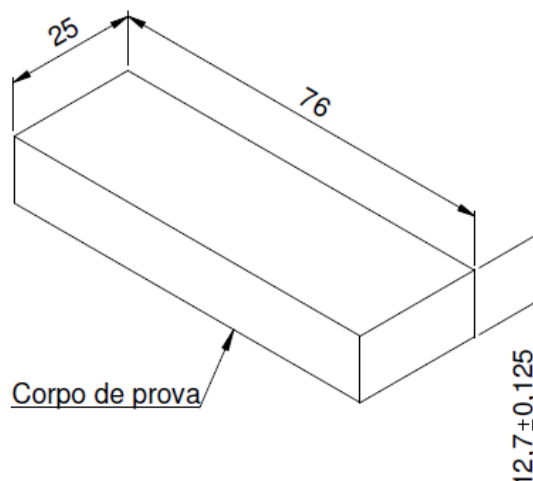
#### **3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

Para início da preparação dos corpos de prova, foi feito o projeto no software CAD com as dimensões necessárias. De posse das dimensões foram

retiradas as amostras das chapas usadas para fabricar os rolos, em seguida foram cortados doze amostras para os testes e foram realizadas as limpezas de todos os corpos de provas para tirar as impurezas.

Conforme a Fig. 5, possui um formato retangular com as dimensões de acordo com a norma (ASTM-G65, 2016), são elas 25 mm por 76 mm e uma espessura de 12,7 mm. Os corpos de provas foram preparados nas superfícies da mesa e posicionados de três em três, de forma a ser aplainadas. Em seguida foram realizadas as operações seguindo a norma (ASTM-G65, 2016), deixando a medida da espessura com uma tolerância  $\pm 0,125$  mm no máximo para todas as amostras.

Figura 5 - Representação do corpo de prova.



Fonte: do Autor (2019)

Foram produzidos 12 corpos de prova conforme a Fig. 5, do material aço ABNT 1045, que após o preparo foram realizados os ensaios desse artigo.

### 3.2 ANÁLISE QUÍMICA

Para a realização da análise, as amostras adquiridas foram enviadas para o laboratório, a fim de confirmar o material construtivo do aço ABNT 1045.

O ensaio foi realizado com 3 medições com um espectrômetro marca GNR e modelo Metallab 75-80, devidamente calibrado. As amostras foram posicionadas para realizar o ensaio, e em seguida foi realizado uma descarga elétrica do espectrômetro e fixada com o bico de contato.

### 3.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Com as amostras já preparadas para a têmpera, foram inseridas no forno de indução da marca JUNG e modelo 2513, a temperatura calculada para  $A_1$  foi de 726 °C e a temperatura calculada para  $A_3$  foi de 792 °C, conforme a equação 1 e 2 respectivamente, ficando por um tempo de 60 minutos para maior uniformidade.

Dos 12 corpos de provas em análise, três amostras não serão realizadas o tratamento térmico, os outros três corpos de provas foram temperados em óleo e os outros três foram temperados em óleo e após esta etapa, foram colocados em um segundo forno a uma temperatura de 300 °C, com o tempo de duas horas para revenimento e por fim as outras três amostras foram tratadas em água.

### 3.4 METALOGRAFIA

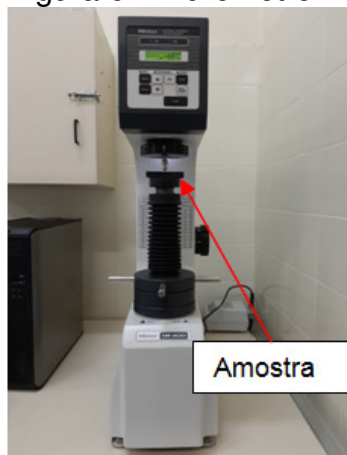
Segundo a norma NBR 13284/1995, os corpos de provas devem ser preparados para análise metalográfica dos metais e ligas. Para cada análise foram retiradas quatro amostras e já obtidas para o ensaio, às amostras foram lixadas com uma lixa d'água com granulação de 80 até 1200, girando os corpos de provas em 90°, de forma que o lixamento elimine os riscos produzidos anteriormente, em seguida as mesmas foram polidas, utilizando um produto de alumina e uma máquina politriz exclusiva para o aço em análise.

Após isso, foram inseridas no microscópio modelo Olympus BX51M no laboratório de caracterização microestrutural (LACAMI), para retirar as micrografias. Elas foram observadas sem ataque com lentes de 100x e foram atacadas com um ácido nítrico, constituídas 98% de álcool etílico e 2,0% de ácido nítrico e observado com lentes de 200x, 500x.

### 3.5 ENSAIO DE DUREZA

Após a têmpera, as amostras foram submetidas ao ensaio de dureza do tipo Rockwell C. Para realizar as endentações, foi utilizado o durômetro modelo HR 400, fabricado pela empresa Mitutoyo, mostrado na Fig. 6.

Figura 6 – Durômetro HR-400.



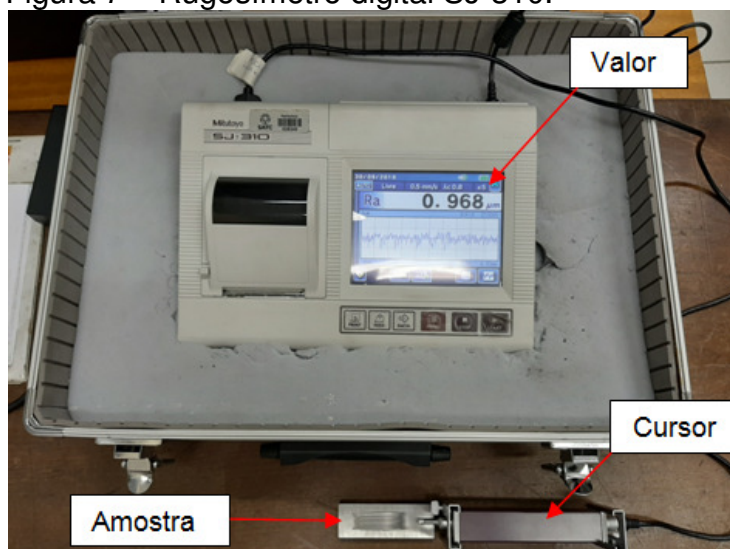
Fonte: do Autor (2019)

A Fig. 6 mostra o durômetro utilizado no ensaio de dureza do tipo Rockwell C, as amostras foram posicionadas, fixadas com o endentador cônico de diamante e em seguida foi configurado uma força de 1471N e o tempo de penetração no corpo de prova de 10s, realizado com três medições para cada tipo de amostra em análise.

### 3.6 RUGOSIDADE

Para dar sequência ao ensaio de abrasão, deve-se ser realizado conforme a norma ASTM-G65 (2016) a análise da rugosidade, podendo influenciar na taxa de desgaste. Portanto quanto mais rugosa a superfície maior será o atrito por ela gerado, sendo assim para obter uma avaliação na superfície das amostras em estudo, foi usado um rugosímetro digital portátil SJ-310, fabricado pela empresa Mitutoyo, conforme a Fig.7.

Figura 7 – Rugosímetro digital SJ-310.



Fonte: do Autor (2019)

Antes de realizar as medições, foi necessário calibrar o equipamento usando uma base padrão com uma rugosidade especificada na certificação de calibração. As medições foram realizadas com uma escala Ra, fornecendo assim as medições dos vales em micrometros.

### 3.7 ENSAIO DE ABRASÃO POR RODA DE BORRACHA EM AREIA SECA

Primeiramente encaminharam-se as amostras para serem pesadas em uma balança de precisão com capacidade de 210g e resolução de 0,001g. Onde se constatou o peso inicial das mesmas, portanto de 1 a 3, consta sem tratamento térmico, as amostras de 4 a 6 possui tratamento térmico em óleo, de 7 a 9 possui tratamento térmico em óleo e duplo revenido e as amostras 10 a 12 possui tratamento térmico em água. Na Tab. 4, podemos observar os seguintes dados.

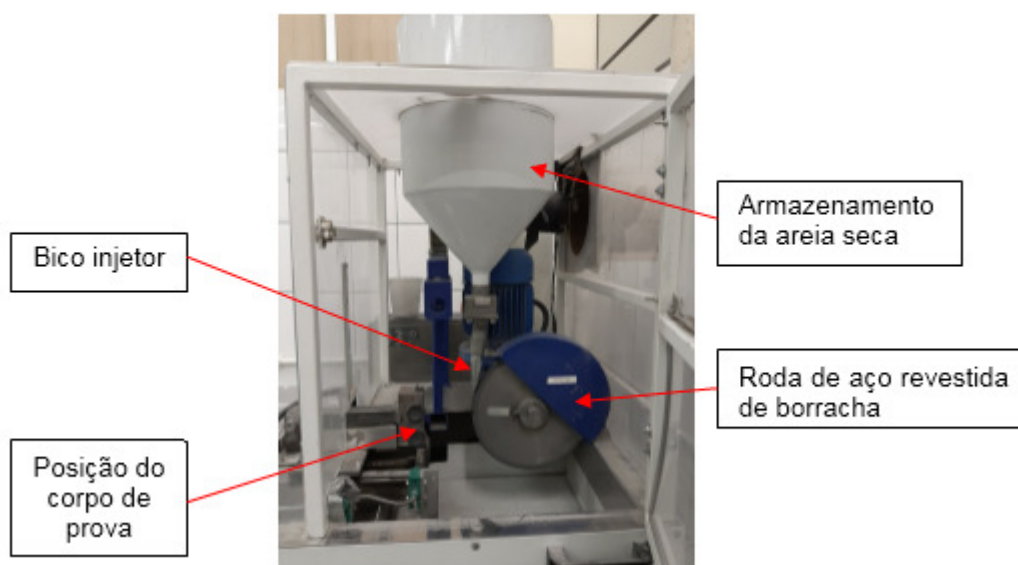
Tabela 4 – Massa Inicial.

Tipos de Tratamentos	Nº da Amostra	Média da Massa (g)
Sem tratamento	1	176,112
	2	175,112
	3	176,343
Tratamento em óleo	4	174,551
	5	174,103
	6	175,106
Tratamento em óleo e duplo revenido	7	175,474
	8	175,107
	9	174,919
Tratamento em água	10	178,387
	11	179,132
	12	178,877

Fonte: do Autor (2019)

Este ensaio envolve uma amostra de tamanho padrão e uma roda de borracha com um material abrasivo de areia sílica padronizado (AFS 50/70). Como mostra a Fig. 8, é colocado a areia seca e em queda livre, que é depositada entre o corpo de prova de desgaste e a roda de borracha rotativa, na qual esta roda é revestida afim de que os grãos não fiquem incrustados entre os corpos.

Figura 8 – Equipamento para desgaste abrasivo.



Fonte: do Autor (2019)

O estudo se baseia nos parâmetros de testes nível A, referente à norma ASTM G-65, conforme a Tab. 5. Portanto para ser validado, requer 3 amostras para cada ensaio, seguindo os procedimentos e aplicação dos parâmetros de regulagem do ensaio.

Tabela 5 - Parâmetros de teste.

Classe	Força aplicada (N)	Revolução da Roda (RPM)	Abrasão Linear (m)	Tempo de Ensaio (min.)
A	130	200	4309	30

Fonte: Adaptado da Norma ASTM-G65 (2016)

Após ter realizado os ensaios de abrasão por roda de borracha em areia seca, foi realizada a limpeza dos corpos de provas para tirar as impurezas. Em seguida foram encaminhadas as amostras para o laboratório com o intuito de realizar a pesagem final através de uma balança de precisão.

Na Tab. 6, pode-se comparar a média da massa inicial com a média da massa final das amostras e após a comparação, pode-se observar a perda de massa para cada tipo de procedimento e ensaio realizado.

Tabela 6 – Média da perda das amostras.

Tipo de Tratamentos	Nº da Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda (g)
Sem tratamento	1	176,112	173,141	2,971
	2	175,112	172,415	2,698
	3	176,343	173,945	2,397
Tratamento em óleo	4	174,551	172,864	1,687
	5	174,103	172,324	1,779
	6	175,106	173,07	2,036
Tratamento em óleo e duplo revenido	7	175,474	173,664	1,810
	8	175,107	173,274	1,833
	9	174,919	173,221	1,698
Tratamento em água	10	178,387	177,234	1,153
	11	179,132	177,782	1,350
	12	178,877	177,877	1,000

Fonte: do Autor (2019)

Com a pesagem inicial e final das amostras, utilizou-se a Eq. 4 para verificar a taxa volumétrica de desgaste abrasivo, a partir da perda de volume encontradas nas mesmas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados adquiridos, iniciando pela análise química, a análise metalográfica, a dureza, a rugosidade e finalizando o ensaio de desgaste abrasivo com seus respectivos análises.

### 4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados obtidos através da análise química das amostras podem ser visualizados na Tab. 7.

Tabela 7 - Composição Química das amostras do aço ABNT 1045.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Al%
0.500	0.187	0.626	0.000	0.000	0.015	0.000	0.017	0.025
Cu%	Ti%	V%	Nb%	B%	Co%	W%	Zr%	Fe%
0.010	0.002	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	98.616
CE%								
0.61								

Fonte: do Autor (2019)

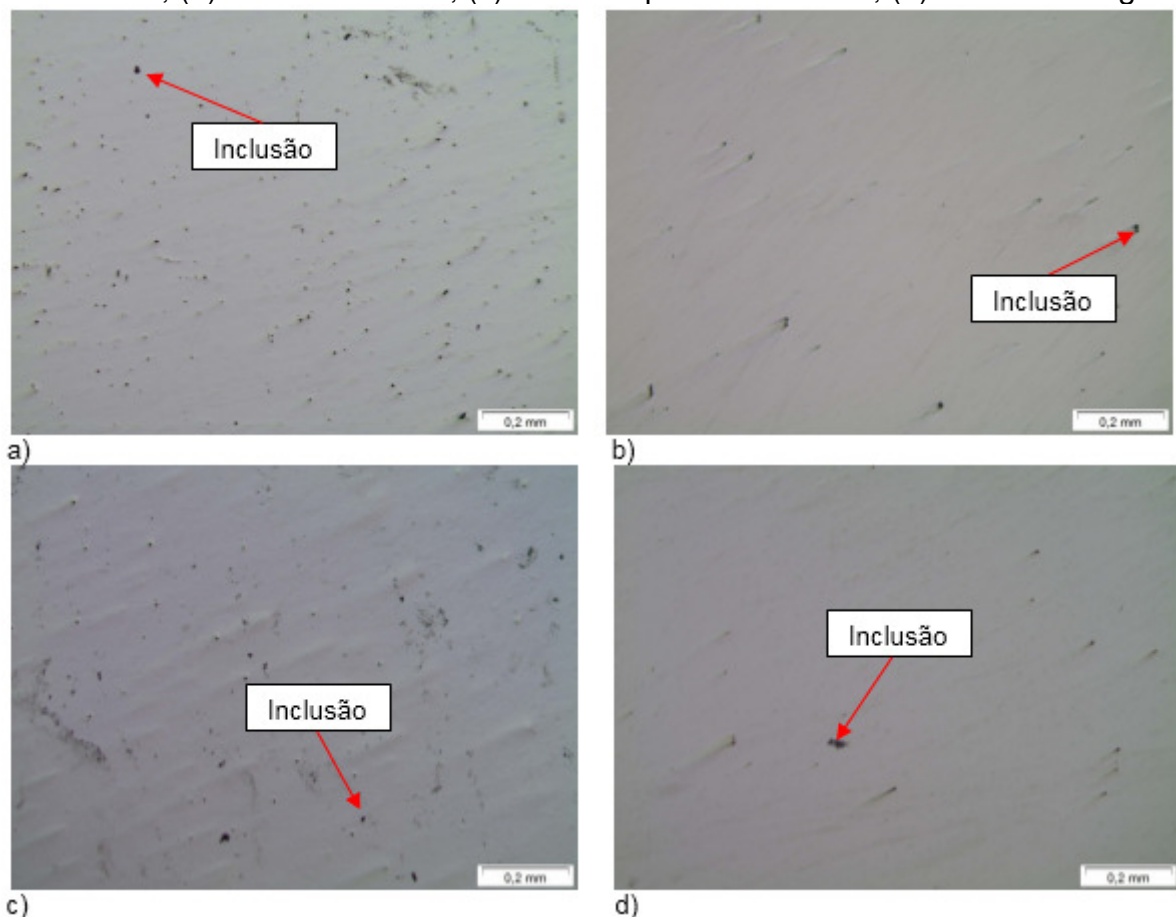
Após a comparação entre a análise química das amostras e a norma NBR 87/2000 do aço ABNT 1045 Tab. (1). Observou-se que o elemento Mn% de 0,626, esta dentro do limite tolerável de 0,6 até 0,9% da composição química, as porcentagens das amostras adquiridas estão de acordo com a respectiva norma.

### 4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

A Fig.9 mostra o tipo e o nível de inclusões do aço ABNT 1045 sem ataque, onde é possível perceber uma quantidade de inclusões de formato globular decorrente no processo de fabricação do aço.

Em todas as condições analisadas: sem tratamento, tratado em óleo, óleo e duplo revenimento e tratado em água, foram encontradas inclusões. Essas inclusões são decorrentes do processo de fabricação dos aços e não se alteram pelos processos de tratamentos térmicos, geralmente são constituídas de óxido metálicos.

Figura 9 – Micrografia da amostra aço ABNT 1045 sem ataque 100x: (a) sem tratamento, (b) tratado em óleo, (c) óleo e duplo revenimento, (d) tratado em água.

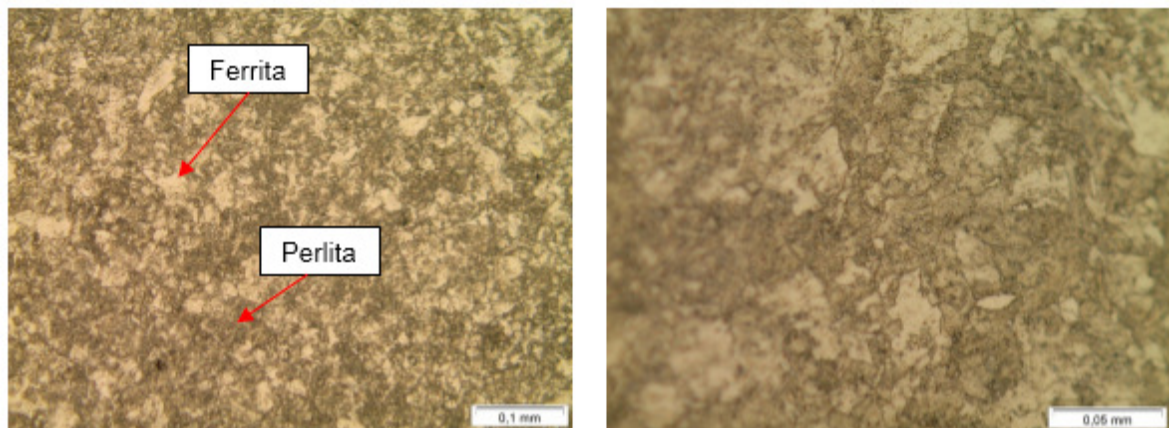


Fonte: do Autor (2019)

Segundo a norma NBR NM 88/2000, apresenta os métodos micrográficos para determinar qual o tipo de inclusão, definir o tamanho e a distribuição. A Fig.9 se classifica como D (tipo óxido globular), onde se divide em série fina e série grossa. A Fig. 9–(a) e Fig. 9-(c), identifica as micrografias sem ataque 100x e como uma série grossa de diâmetro nominal da lâmina 1,2 mm, ficando com o nível de severidade de 3,0. A Fig.9-(b) e Fig. 9-(d), identifica as micrografias sem ataque 100x e como uma série grossa de diâmetro nominal da lâmina 0,8 mm, ficando com o nível de severidade de 1,0.

Para se analisar as transformações da microestrutura adequada no microscópio, realizou-se o lixamento e polimento, seguindo de um ataque com ácido nítrico 2,0% na superfície das amostras. As metalografias obtidas nos corpos de provas se encontram na Fig.10, sem tratamento, na Fig.11, tratamento em óleo, na Fig.12, tratamento em óleo e duplo revenimento e tratamento em água na Fig.13.

Figura 10 – Micrografia da amostra aço ABNT 1045 sem tratamento.



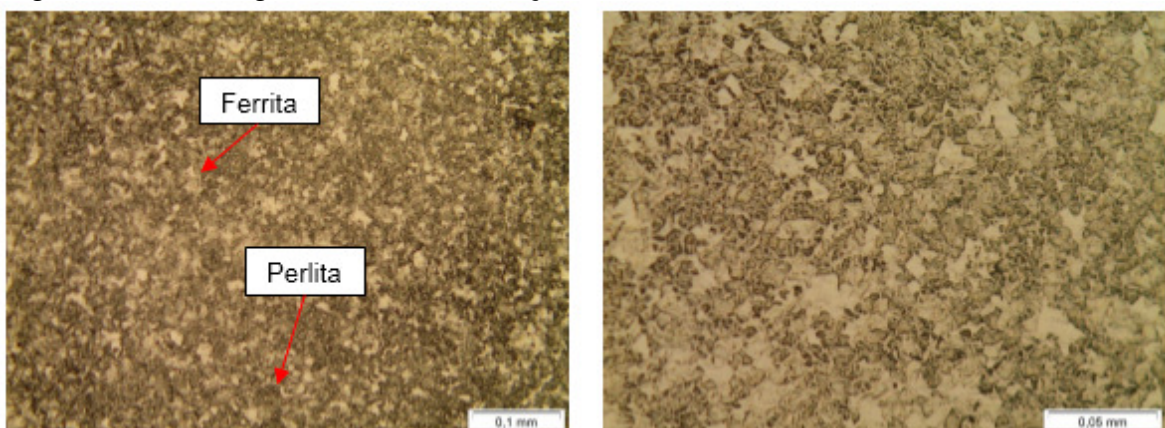
a) Após ataque – aumento 200x

b) Após ataque – aumento 500x

Fonte: do Autor (2019)

Na amostra sem tratamento térmico, é possível observar que os grãos de perlita, parte escura e os grãos de ferrita, parte clara, possui uma distribuição de forma homogênea.

Figura 11 – Micrografia da amostra aço ABNT 1045 tratamento em óleo.



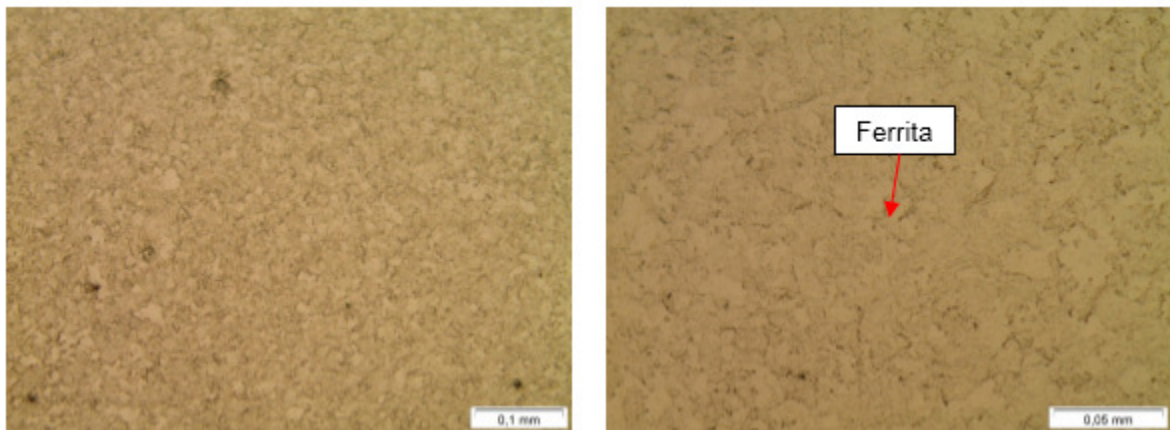
a) Após ataque – aumento 200x

b) Após ataque – aumento 500x

Fonte: do Autor (2019)

A Fig. 11 possui a mesma microestrutura da amostra sem tratamento da Fig. 10, no entanto, é possível ver a maior distribuição dos grãos pela micrografia.

Figura 12 – Micrografia da amostra aço ABNT 1045 tratamento em óleo e duplo revenimento.



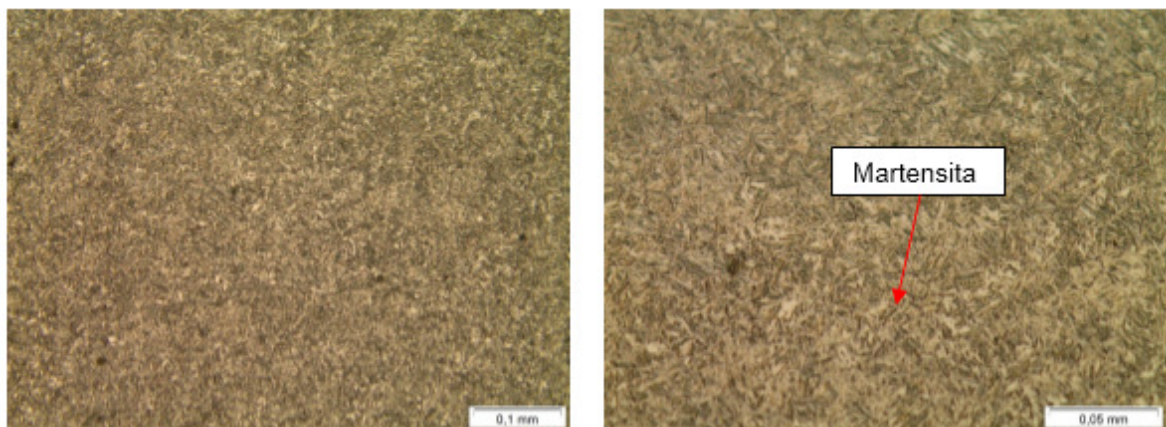
a) Após ataque – aumento 200x

b) Após ataque – aumento 500x

Fonte: do Autor (2019)

Na Fig. 12, ocorreu um crescimento de grão reduzindo assim a dureza e o alívio de tensões do tratamento da amostra, podendo observar claramente a ferrita.

Figura 13 – Micrografia da amostra aço ABNT 1045 tratamento em água.



a) Após ataque – aumento 200x

b) Após ataque – aumento 500x

Fonte: do Autor (2019)

De acordo com a Fig.13, nessa condição não houve precipitação de carbono, permitindo assim a sua homogeneização na matriz ferro e predominando a matriz martensítica em formas de agulhas, diferenciando-se das demais amostras.

### 4.3 DUREZA

Com as endentações medidas e os dados colhidos, foi possível chegar às durezas, com as três medições realizadas para cada amostra em análise. O resultado pode ser verificado de acordo com a Fig. 14.

Figura 14 – Medição de dureza Rockwell C.



Fonte: do Autor (2019)

Conforme é representado pelo gráfico da Fig.14, foi possível chegar às durezas médias de todos os corpos de provas e aos seus desvios padrões, como estão representados seus valores na Tab. 8.

Tabela 8 – Média das durezas e desvios de todas as amostras.

Tratamentos	Média (HRc)	Desvio padrão
Sem tratamento	10,330	0,501
Óleo	18,633	2,250
Óleo e duplo revenimento	17,530	1,918
Água	48,667	2,517

Fonte: do Autor (2019)

Analisando os resultados das durezas e desvios padrões, é possível verificar que o corpo de prova resfriado em água, obteve o maior valor.

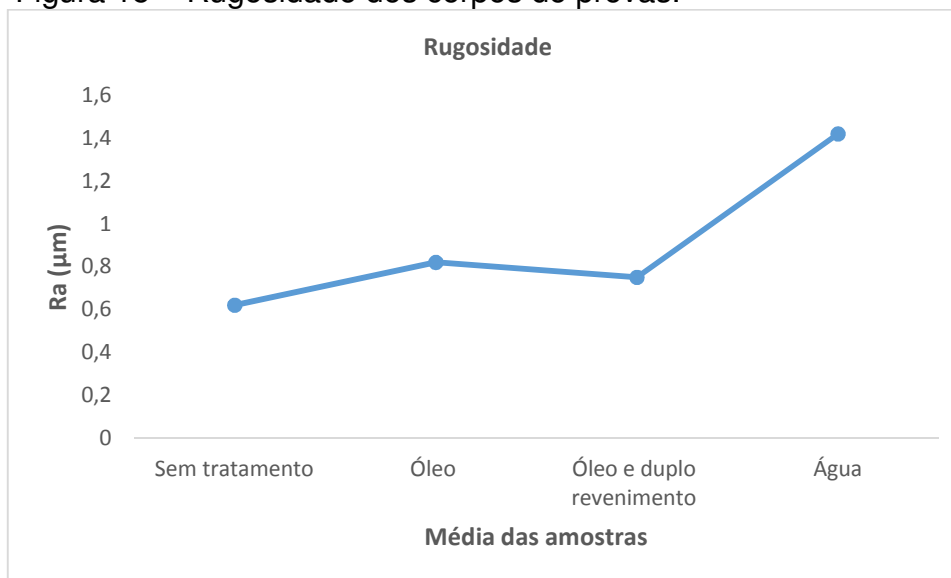
Sabendo-se que o valor da dureza é diretamente proporcional à resistência mecânica e geralmente proporcional a tenacidade. Podemos afirmar que esta amostra é mais resistente e mais frágil que a amostra resfriado em óleo.

Por este motivo, pode-se analisar que a amostra resfriada em óleo e a amostra resfriada em óleo e com duplo revenido, terá a menor resistência mecânica e a maior tenacidade, o que está evidenciado pelas durezas obtidas.

#### 4.4 RUGOSIDADE

Stoeterau (2004) relata que a rugosidade da superfície pode influenciar no desgaste abrasivo, tendo um efeito inicialmente aos testes, com o atrito sofrido pelo contato da roda. A superfície do material possui uma rugosidade não padronizada do desgaste, por isso teve a necessidade de verificar os valores da rugosidade da superfície de cada amostra em análise, que futuramente iriam ser ensaiados com o ensaio de desgaste abrasivo, foram realizadas três medições para cada amostra e devidamente retirado à média de cada amostra, conforme a Fig. 15.

Figura 15 – Rugosidade dos corpos de provas.



Fonte: do Autor (2019)

Conforme é representado pelo gráfico da Fig.15, foi possível chegar às durezas médias de todas as amostras e aos seus desvios padrões, como estão representados seus os valores na Tab. 9.

Tabela 9 – Média das rugosidades e desvios das amostras.

Tratamentos	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão
Sem tratamento	0,6173	0,0170
Óleo	0,8263	0,1331
Óleo e duplo revenimento	0,7543	0,1358
Água	1,4267	0,0924

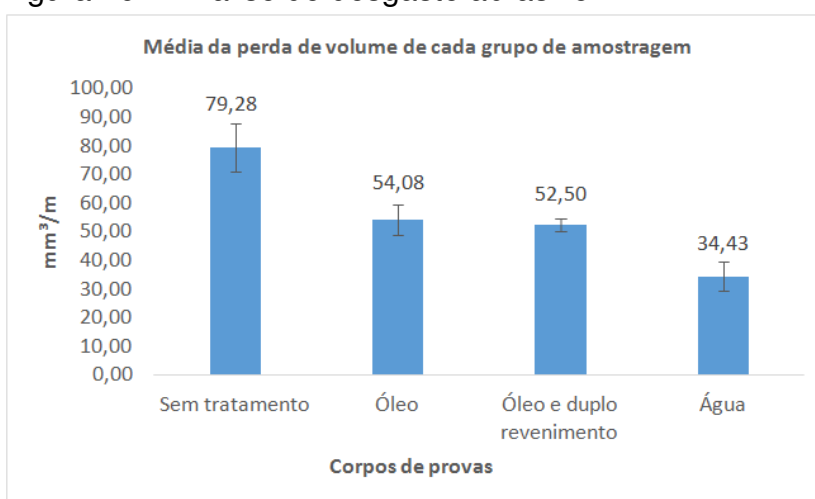
Fonte: do Autor (2019)

Os resultados para cada tratamento pode ser visto na Fig.15 e na Tab. 9, é possível verificar que a amostra tratada em água obteve o maior resultado, possivelmente ficou superior a norma no que condiz a  $0,8\mu\text{m}$ , as demais amostras se encontra com picos próximos a norma e inferior a mesma.

#### 4.5 ENSAIO DE DESGASTE

De acordo com a Fig. 16, pode-se analisar o desgaste ocorrido em cada processo de análise obtido sobre o material aço ABNT 1045. Com a ajuda de planilha de cálculo em software específico, foi calculada a taxa volumétrica de cada amostra a partir da perda de massa e do volume perdido.

Figura 16 – Análise de desgaste abrasivo.



Fonte: do Autor (2019)

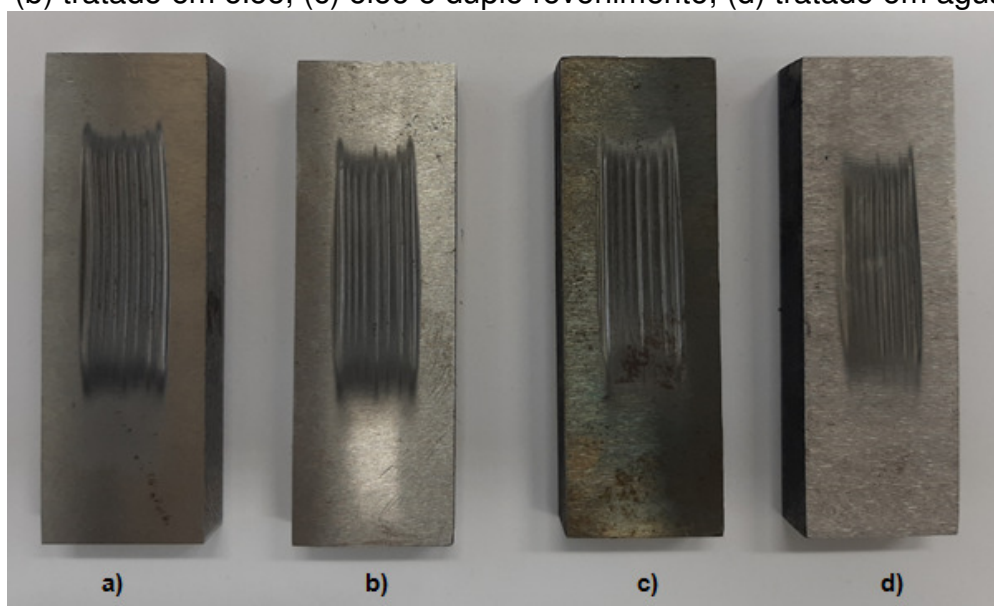
Com os resultados e análises do gráfico da Fig.16, pôde-se observar que a amostra sem tratamento obteve  $79,28 \text{ mm}^3/\text{m}$ , a maior taxa volumétrica de

desgaste abrasivo, por ter a menor dureza, influencia o maior desgaste do material. O tratamento em óleo pôde-se observar 54,08 mm<sup>3</sup>/m e o tratamento óleo e duplo revenimento 52,50 mm<sup>3</sup>/m de desgaste.

Comparando com os resultados dos demais, a amostra tratada em água obteve 34,43 mm<sup>3</sup>/m, isso comprova que a amostra possui a maior resistência ao desgaste ficando um pouco mais baixo dos tratados em óleo, apesar de que o corpo de prova tratada em água possuir a maior dureza é possível perceber que a dureza influencia diretamente no desgaste do material, já que o material mais duro obteve o melhor resultado de desgaste em questão.

Os perfis deixados nas amostras após ensaios, pode ser observados na Fig.17, onde é possível verificar um corpo de prova de cada análise.

Figura 17 – Perfil de desgastes após ensaio: (a) sem tratamento, (b) tratado em óleo, (c) óleo e duplo revenimento, (d) tratado em água.



Fonte: do Autor (2019)

De acordo com a Fig.17 é possível identificar visualmente uma diferença entre as amostras em análises e que o material mais desgastado foi à amostra sem tratamento e o material menos desgastado em relação aos demais foi à amostra tratada em água.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos estudos teóricos e experimentais dessa pesquisa, pôde-se chegar as seguintes conclusões:

- Na metalografia do aço ABNT 1045, a amostra tratada em água, obteve a martensita, o que era esperado, diferenciando das demais amostras tratadas.
- Os resultados obtidos pelo tratamento indicaram não apenas o aumento de dureza do material, aço ABNT 1045, mas também a resistência ao desgaste dos diferentes corpos de provas analisados.
- A rugosidade superficial das amostras em análise influenciou ativamente o nível de desgaste inicial. O corpo de prova tratado em água obteve  $1,4267\mu\text{m}$ , não teve um ganho satisfatório devido à rugosidade estar fora de norma, diferente das outras amostras que obtiveram valores de rugosidade próximos à norma no que condizem  $0,8\ \mu\text{m}$ .
- Os corpos de provas submetidos aos ensaios de desgastes, por norma padrão tiveram resultados satisfatórios, visto que a amostra tratada em água com resultado de  $34,43\ \text{mm}^3/\text{m}$ , foi a que menos desgastou diferenciando-se das outras.
- Apesar da amostra tratada em água obter a maior resistência ao desgaste com  $34,43\ \text{mm}^3/\text{m}$  e a maior dureza com  $48,667\ \text{HRc}$ , não foram selecionadas para uso no processo por um detalhe técnico escolhido pela empresa, onde a mesma prioriza que o maior desgaste deve ocorrer no rolo. Por isso o melhor resultado a ser aplicado no rolo, seria a amostra tratada em óleo e duplo revenido que obteve o resultado de  $52,50\ \text{mm}^3/\text{m}$  de desgaste e de dureza  $17,530\ \text{Hrc}$ , obtendo assim o melhor desempenho e durabilidade na aplicação do equipamento.
- Para ser abordado as possibilidades de estudo, tem-se a necessidade de pesquisas nesse campo da engenharia, para verificar o processo de fabricação e adequação na aplicação.

## **Agradecimentos**

Agradeço minha família e amigos pelo apoio, ao professor Dr. Anderson Daleffe pelos seus conhecimentos passados e orientação neste trabalho. Agradeço também pela faculdade SATC por disponibilizar seus laboratórios para realização dos ensaios práticos.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT – NBR 13284/1995**: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT – NBR NM 87/2000**: Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica – Designação e Composição Química. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT – NBR NM 88/2000**: Aço – Determinação de inclusões não metálicas – Método micrográfico. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT – NBR NM 172/2000**: Critério de Classificação dos Aços. Rio de Janeiro, 2000.

ASSUNÇÃO, F. C. R. – **Siderurgia no Brasil 2010-2025: Subsídios para tomada de decisão**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Ministérios da Ciência e Tecnologia. Brasília – DF, 2010.

ASTM G65-16. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken. Pennsylvania. 2016.

AZEVEDO, Alessandra Gois Luciano de. **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. 2002. 102p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza/CE, Brasil, 2002.

BALL, A. The **mechanisms of wear and the performance of engineering materials**. Vol. 86. n.1.Ed.J.S..Afr. Inst. Min. Metall. 1986. 1-13p.

BAPTISTA, A. L. B. ; BAPTISTA, L. C; BAPTISTA, R. C. – **Tubos Centrifugados de Aços Inoxidáveis para Indústria Petroquímica: Seleção, Característica e Produção**. Trabalho Apresentado do Espaço de Ciência, Tecnologia, Engenharia, Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia de 17 a 21 de Outubro de 2016 – EEIMVR/UFF – Volta Redonda – RJ.

BUCHELY, M.F. The effect of microstructure on abrasive wear hardfacing alloys, Tribology and surfaces Group, National University of Colômbia, Medell'in, Colômbia. Science Direct. Wear, p.52-61, 259. 2005.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: característica geral, tratamentos térmicos, principais tipos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, SP, 2005.

Deutsches Institut f\_r Normung **DIN50320** Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste, Metalurgia & Materiais, 53 p., 1997, p 619-622.

DOERING, Asno et al. Evaluation od ASTM G65 Abrasive – Spanning 13 Years of Sand. Elsevier, Houston, Tx, Usa, v. 271, p. 1252-1057 jul. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004316481100144X>>. Acesso em: 29 de maio de 2019.

FREITAS, P. S. **Tratamento Térmico Dos Metais**. 1. Ed. [S.l]: SENAI, 2014.

GERDAU S. A. **Catálogo de Aços para Construção Mecânica**. Disponível em: < <http://www.ggdmetals.com.br/CatConstrução.pdf>>. Acesso em: 14 de julho de 2019.

KATO, K. Adachi, K., 2001, “**Wear Mechanisms**”, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22.

LIMA, Aldemi C.. **Estudo da Aplicação de Revestimento Duro por Soldagem com Arames Tubulares Quanto á Resistência ao Desgaste de Facas Picadoras de Cana de Açúcar.** 2008, 232p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

METALS HANDBOOK. **Heat treating of Steels.** 10 ed. Ohio: American Society for Metals, v.4, 1991.

METALS HANDBOOK. **Heating treating: Annealing of Steels.** 8 ed. USA: American Society for Metals, v.4, 1994.

SACRAMENTO, Alcenir Beling do. **Comparação de ensaio de desgaste a frio e a quente sem lubrificação na configuração pino-disco:** pino de aço inoxidável supermatensítico supercromo 13% e disco de alloy 250. 2014. 55f. Monografia de graduação – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014. Disponível em: <[http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/pg\\_-\\_alcenir.pdf](http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/pg_-_alcenir.pdf)>. Acesso em: 1 de junho de 2019.

SCHEIDEMANTEL, R. H. **Utilização de métodos teóricos para avaliação da temperabilidade Jominy de aços com diferentes composições químicas.** 2014. Trabalho de conclusão – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, RJ, Brasil, 2014.

SOARES, Edmo Jr. **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços Ferramenta para Trabalho a frio.** 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, SP, 2006.

STOETERAU. R. L. **Tribologia** – EMC 5315 – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

VILLÁBON, L; SINATORA. A. Construção e Instrumentação de Abrasômetro do tipo Roda de Borracha Para o Estudo do comportamento Tribológico de Aços. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, Lisboa, v. 13, p. 1-11, 2006.

ZUM-GAHR, K-H., 1987, “**Microstructure and Wear of Materials**”, Tribology Series, 10, Elsevier, PP. 1-6.