

ANÁLISE DO DESGASTE POR ABRASÃO EM CAPAS DE DENTE FABRICADAS EM AÇO ASTM SC 1045 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO

Rodrigo Disner Gava¹

Reginaldo Rosso Marcello²

Fábio Peruch³

Resumo: Ao tratar-se de máquinas de mineração, as solicitações de resistência, tenacidade e dureza associados aos mecanismos de desgastes envolvidos vem à tona, é muito comum esse tipo de desgaste ser responsável pelo aceleramento da vida útil de um componente exposto em contato com o solo. Neste trabalho, o objeto de estudos serão as capas de dente utilizadas na concha de uma escavadeira responsável pelo carregamento de caminhões em um britador de rochas. O principal mecanismo de desgaste associado é o desgaste abrasivo a três corpos, causando o riscamento e conseqüentemente a remoção precoce do material base. A capa de dente usada nesta máquina tem aproximadamente a duração de três semanas. Para aumentar a vida útil deste componente, propõe-se a utilização de um material que apresentasse boa resistência mecânica e ao desgaste abrasivo. O material selecionado foi o ASTM SC 1045, um aço médio carbono muito comum na indústria, foi executado o tratamento térmico de têmpera com três meios de resfriamento, selecionando um, e seguindo para o tratamento térmico de revenido, em três temperaturas, como sendo: 350, 400 e 450°C, com essas pequenas variações de temperaturas, o material apresentou propriedades distintas. Tecnicamente, com base nos ensaios realizados em laboratórios, conseguiu-se aumentar a vida útil deste componente.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo. Capas de dente. Tratamento térmico.

1. INTRODUÇÃO

Com base no trabalho cotidiano de máquinas pesadas em diferentes aplicações, tais como: mineradores de diferentes tipos de solo, terraplanagem, britadores, entre outros, observa-se o desgaste excessivo dos componentes móveis da concha de escavação em virtude da penetração ao solo.

O desgaste em componentes de máquinas e equipamentos rodoviários pode apresentar-se de diferentes formas, como por deslizamento, rolamento, abrasão, erosão, impacto, corrosão e por choque térmico. Já se tratando de elementos de

¹ Graduando em Bacharel em Engenharia Mecânica. E-mail: dido.gava@hotmail.com.br

² Prof. Me. Reginaldo Rosso Marcello. E-mail: reginaldo.marcello@satc.edu.br

³ Prof. Me. Fabio Peruch. E-mail: fabio.peruch@satc.edu.br

penetração no solo, a perda de massa desses elementos é provocada quase que exclusivamente pelo desgaste abrasivo, (DEUS, 2008).

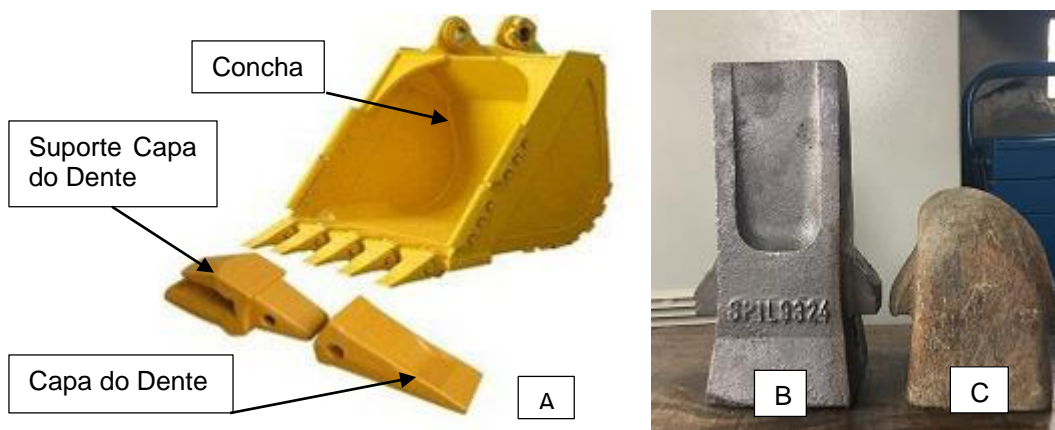
A taxa de desgaste depende do grau de penetração da partícula na superfície do componente e é também proporcional a dureza do mesmo. Com a operação desses equipamentos, os componentes móveis estão submetidos a movimentos cíclicos, tendo o contato direto do aço com o material abrasivo, onde ocasiona a perda de massa.

Geralmente os equipamentos rodoviários estão submetidos a serviços mais brutos, gerando um elevado esforço nos componentes móveis. A alta resistência do solo em relação ao movimento de escavação, ocasiona um alto nível de atrito, assim, submetendo ao desgaste abrasivo.

Com a grande demanda de serviço no processo de britagem, onde a máquina responsável pelo carregamento dos caminhões é uma escavadeira hidráulica, da marca: caterpillar, modelo: 315 DL, (que será a base do estudo), é submetida ao carregamento de solo rochoso, isso gera um grande desgaste nos componentes móveis da concha de escavação.

A Fig. 1, ilustra a concha de escavação e seus componentes (A), mostrando também uma capa de dente nova (B), e uma retirada com sua vida útil excedida (C).

Figura 1: Componentes da concha e capa de dente.



Fonte: Única Tratores (2019)

Fonte: do Autor (2019)

Com o desgaste excessivo da capa, surgiu a proposta do estudo de um material, analisando suas propriedades mecânicas através do tratamento térmico, assim pretendendo atingir a maior resistência ao desgaste abrasivo possível.

Após levantamento de dados sobre o tema, foi observado que, com a escavadeira trabalhando 9 horas por dia, 5 dias da semana, as capas de dente têm a duração de 3 semanas, totalizando 135 horas de vida útil cada jogo. Sendo que, cada jogo consiste em 6 capas de dente, levando-se em conta este tempo de duração, anualmente gasta-se em média 17 jogos, dando um total de 102 capas de dentes.

Em seguida foi pesquisado valores atuais da tabela FIPE da máquina e respectivos valores das capas de dente. Concluiu-se que, o valor anual gasto com capas de dente, representa o valor de 6 % do valor total da máquina. Vale ressaltar que esses valores estão sujeitos à alteração devido a depreciação do equipamento.

Para a substituição destes componentes, necessita-se de ferramentas adequadas e um mecânico especializado, levando em consideração um tempo de aproximadamente 2 horas de serviço para a troca, e conseqüentemente da máquina parada sem produção.

O objetivo será executar testes de desgaste abrasivo na roda de borracha, dureza e ensaio de tração em corpos de prova, logo, analisar os resultados, e a perda de volume associado ao desgaste. Os corpos de prova serão fabricados em aço ASTM A 958 SC 1045 com tratamento térmico de têmpera, logo, resfriando os corpos de prova em água e óleo de têmpera, em seguida será feito o tratamento térmico de revenido em diferentes temperaturas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho serão abordados os mecanismos de desgaste, tendo como ênfase o desgaste abrasivo, em seguida o tratamento térmico, tendo como base do estudo têmpera e revenido.

2.1 MECANISMOS DE DESGASTE

Santos (2009), relata que o desgaste depende de todo o sistema tribológico no qual está submetido, onde diferentes variáveis influenciam de modo considerável. Já Fernandes e Martendal, (2017) descrevem o desgaste como um dano progressivo causado pelo movimento cíclico com outras substâncias, também pode ser definido como a perda progressiva do material da superfície de um corpo em contato com o outro.

Na literatura encontra-se autores que citam diferentes tipos de desgastes, sendo eles: por abrasão, adesão, corrosão, fadiga superficial, impacto, erosão, cavitação e atrito. Já, de acordo com a norma DIN 50320, os quatro principais mecanismos de desgaste são:

Adesão: Formação de pontos adesivos entre faces, exemplo, união por soldagem fria.

Abrasão: Remoção superficial de massa devido a arrancamento.

Fadiga: Formações de trincas na superfície devido a tensões cíclicas, resultando na separação do material.

Reação triboquímica: Formação de produtos através de reações químicas, tendo como, oxidação, corrosão em meio aquoso, corrosão em meios orgânicos e corrosão em metais líquidos.

Tendo como ênfase neste trabalho o desgaste abrasivo.

2.1.1 Desgaste Abrasivo

A abrasão decorre quando há a retirada do material da superfície por ação de partículas duras. A taxa de desgaste depende da profundidade de penetração do abrasivo sobre o material exposto a abrasão, pode ser entendido como a idéia de ranhuras ou asperezas sobre a superfície do material (MACHADO, 2015).

Segundo a norma ASTM G40, o desgaste abrasivo ocorre conveniente a partículas duras forçadas uma contra a outra e com o movimento ao longo da superfície sólida.

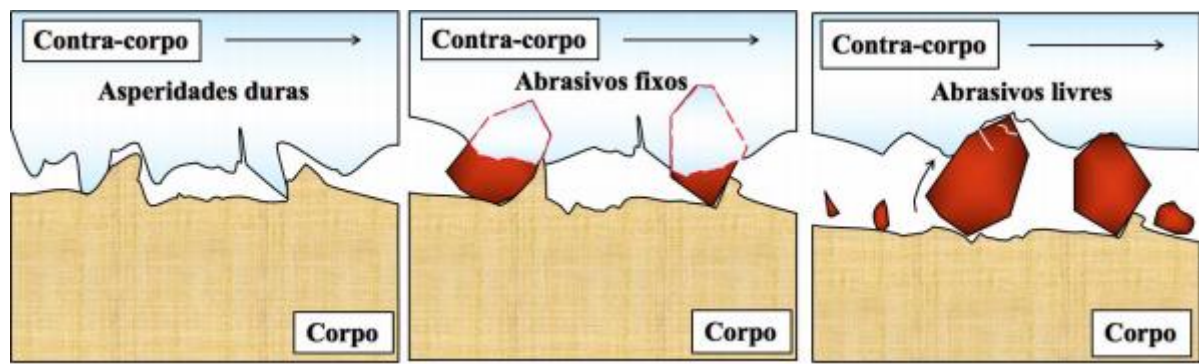
Desgaste por abrasão é a retirada de massa do material, através de contato com partículas duras. As partículas podem estar sendo pressionadas entre duas interfaces em movimento relativo, ou serem a parte da rugosidade de uma das superfícies, sendo submetida a fortes pressões, ocasionada pelo movimento ou pelo amassamento a retirada do material (DEUS, 2008). Martins (2015) define que, dos diversos tipos de desgaste, o desgaste abrasivo ocorre em mais de 50% dos casos, sendo considerado o mais severo, e o mais encontrado na indústria.

Os processos abrasivos dividem-se em duas categorias; Abrasão a dois corpos e Abrasão a tres corpos. Abrasão a dois corpos (riscamento de partículas) é quando partículas duras fixas ou aspergidas, entram em contato com a superfície do

material a ser estudado. Já a abrasão a três corpos (rolamento de partículas) representa o movimento de partículas abrasivas livres entre duas superfícies em movimento relativo (DE MELLO, 1994).

Figueiredo Neto (2017), considera a abrasão como sendo, a perda de massa conveniente ao movimento relativo entre duas superfícies e decorrente da ação de protuberâncias duras em uma das superfícies, partículas abrasivas fixas em uma das superfícies e partículas abrasivas livres entre duas superfícies, conforme Fig. 2.

Figura 2: Classificação do desgaste abrasivo.



Fonte: Figueiredo Neto (2017)

Em qualquer uma destas situações, a remoção de material entre a superfície e a partícula só ocorrerá quando, as partículas duras são forçadas contra uma superfície, quando houver uma relação de dureza superior da partícula do que da superfície, quando houver movimento relativo, e quando a geometria da partícula for favorável a ponto de obter o desgaste.

2.2 AÇOS FUNDIDOS

Aços fundidos resultam de um material líquido sendo vazado em moldes de areia ou metálico, assim com a secagem do material vazado, adquire a forma exata da cavidade do molde. Quando se trata de peças fundidas, as peças já saem praticamente com a forma definida, necessitando posteriormente de pequenos acertos através do processo de usinagem (INFOMET, 2019).

Entre a classificação dos aços fundidos, tem-se os aços ligados, que se destacam por apresentar maiores propriedades mecânicas através de elementos de

liga adicionados em sua composição química, assim, tendo a capacidade de elevar sua resistência a tração, a resistência ao desgaste que o material está submetido, ao choque, impacto, a capacidade de suportar elevadas temperaturas e pressão, entre outras (CHIAVERINI, 2008).

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico é o procedimento de aquecimento e resfriamento, em condições controladas de ligas metálicas, onde o objetivo é alterar suas propriedades, como, dureza, elasticidade, ductilidade, resistência a tração, a peça adquire essas propriedades sem alterar seu estado físico (CALLISTER, 2007).

Com a melhora de algumas propriedades mediante ao tratamento térmico, pode-se obter a piora em outras. Por exemplo, quando procura-se aumentar a resistência mecânica e a dureza, como consequência, ocorre a diminuição da ductilidade. Por isso, o tratamento térmico necessita de cuidados minuciosos para que as distorções sejam reduzidas ao mínimo (CHIAVERINI, 2004).

Os mais comuns entre os tratamentos térmicos, para Silva e Mei (1995), são: recozimento, normalização, têmpera, revenido, tratamentos isotérmicos nos aços, endurecimento por precipitação e tratamento termoquímico.

Neste trabalho será abordado o tratamento térmico de têmpera e revenido.

2.3.1 Tratamento Térmico de Têmpera e Revenido

Os aços selecionados para o tratamento térmico de têmpera, devem obter teores de carbono acima de 0,4%. Os aços com teores abaixo disso, não apresentam microestrutura martensítica após a têmpera devido a baixa porcentagem de carbono (MEDEIROS, 2013).

O tratamento de têmpera em metalurgia, é frequentemente usado para o endurecimento dos aços ao introduzir martensita. Forçando a passar pelo seu ponto eutetóide onde a austenita se encontra estável, isso ocorre com o resfriamento brusco do material (ALMEIDA, 2016).

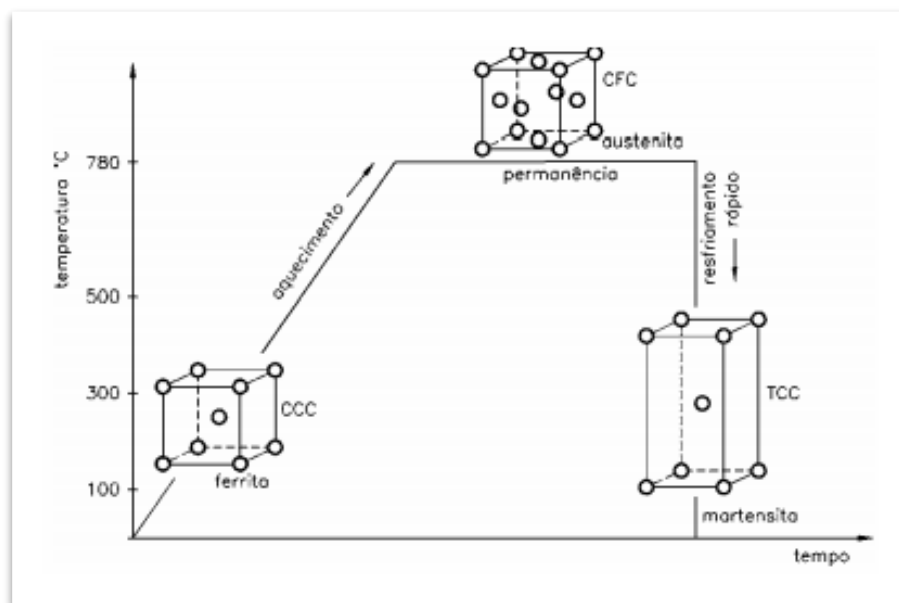
O processo de têmpera nos aços, consiste no aquecimento acima de sua temperatura crítica, o aquecimento, tem como objetivo obter a organização dos cristais

numa fase chamada austenitização, portanto o resfriamento brusco visa obter a estrutura martensítica. Esta condição de resfriamento pode ser obtida em água, óleo, salmoura e até mesmo em ar. A velocidade de resfriamento nessas condições, dependerá do tipo do aço e de sua geometria (BATISTA E NASCIMENTO, 1999).

No resfriamento rápido, os átomos de carbono ficam aprisionados no interior da austenita. Portanto, os átomos produzem deformações no retículo da ferrita, obtendo tensão no material e aumentando a dureza (MAXITRATE, 1992).

Conforme Fig. 3, com o resfriamento rápido da austenita, não há tempo para que se transforme em ferrita, cementita ou perlita. A austenita se transforma em um novo constituinte do aço chamado martensita (SCAVONE,2000).

Figura 3: Fases aquecimento e resfriamento rápido.



Fonte: SENAI (2011)

Com base na Fig. 3, observa-se que, com o aquecimento e tempo de permanência, a estrutura transforma-se de ferrita e perlita para austenita, assim com o resfriamento brusco, obtém-se a martensita.

O tratamento térmico de revenimento se dá com o reaquecimento das peças temperadas, com temperaturas abaixo da linha inferior de transformação. Com a variação destas temperaturas, resulta-se em grande ou pequena transformação da estrutura martensítica (FERMAC, 2019).

Para CIMM (2019), o processo de revenimento é executado após o

endurecimento no metal pelo tratamento térmico de têmpera, peças que sofrem esse processo tendem a ser frágeis e quebradiças. O revenimento é aplicado para obter o alívio de tensões internas, corrigir a tenacidade e a dureza excessiva.

2.4 AÇO CARBONO SC 1045

Aço carbono é um aço sem a adição proposital de outros elementos, abrangendo assim, o carbono e mais quatro elementos residuais sempre encontrados nos aços, e que permanecem em sua composição durante o processo de fabricação, sendo eles, manganês, silício, fósforo e enxofre. O aço carbono pode ser denominado como: baixo carbono (até 0,30% de carbono), médio carbono (de 0,30% a 0,60% de carbono) e alto carbono (acima de 0,60% até 2,11%), cada um com suas aplicações (TUBONASA, 2019).

Um aço denominado como baixo carbono, apresenta dureza e resistência mais baixas, porém, a tenacidade e ductilidade são altas, em geral não é tratado termicamente. Já um aço médio carbono, possui maior resistência e dureza e menor tenacidade e ductilidade comparado ao baixo carbono, apresenta uma quantidade suficiente de carbono para receber tratamento térmico, geralmente tem aplicação em peças que necessitam elevadas resistência mecânica e ao desgaste e tenacidade. O alto carbono é o que apresenta maior dureza e resistência, mas em controversa é o que apresenta menor ductilidade entre os aços carbono (SOUZA, 2012).

O aço ASTM SC 1045 é classificado como médio carbono, é um aço comum de média resistência, indicado para a fabricação de engrenagens comuns, peças forjadas, eixos, virabrequim, componentes de máquinas, penetradores de solo, entre outros, este aço após ser tratado termicamente, apresenta melhoras em sua resistência e tenacidade (LUZ, 2017).

A Tab. 1 apresenta a composição química do aço SC 1045, de acordo com a norma ASTM A 958.

Tabela 1: Composição química equivalente do aço SC 1045.

ASTM A 958	% C	% Mn	% P _{máx}	% S _{máx}	% Si
	0,43/0,50	0,50/0,90	0,040	0,040	00,30/0,60

Fonte: ASTM A 958 (2000)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A elaboração do procedimento experimental foi dividida em etapas, como sendo: A escolha do material base do estudo, a fabricação dos corpos de prova, o tratamento térmico de têmpera e revenido, o ensaio de tração, a metalografia, dureza e por fim o ensaio abrasivo na roda de borracha.

3.1 ESCOLHA DO MATERIAL BASE DO ESTUDO

Para poder selecionar o material a ser usado no projeto, antes foi selecionado uma amostra do material usado atualmente na concha da escavadeira, e foi encaminhada para análises em laboratório, como sendo: composição química, metalografia, dureza e ensaio abrasivo na roda de borracha.

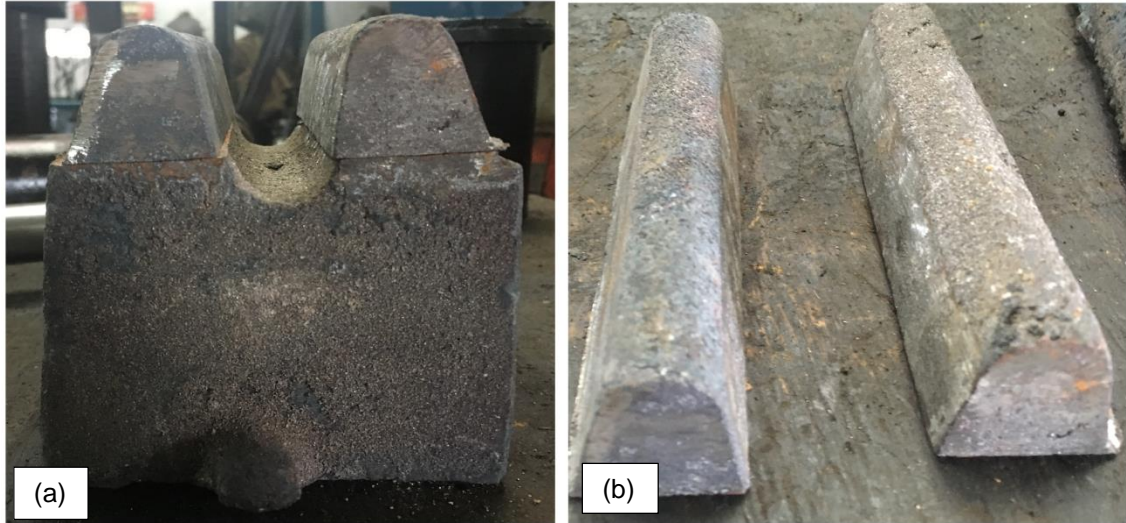
Após testes feitos e leituras sobre alguns artigos relacionados, foi selecionado o ASTM SC 1045, por ser um aço de baixo custo benefício e que adquire elevada resistência mecânica e ao desgaste e boa tenacidade após tratamento térmico.

3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a fabricação dos corpos de prova, foram fundidos blocos padrão segundo a norma ASTM E8-13, para garantir que as impurezas existentes no metal em estado líquido não ficassem na parte útil que será aproveitada para a execução dos corpos de prova.

Na Fig. 4 pode-se observar a esquerda (a), o bloco padrão fundido, e a direita (b), a parte útil retirada do bloco que será usada para a fabricação do corpo de prova.

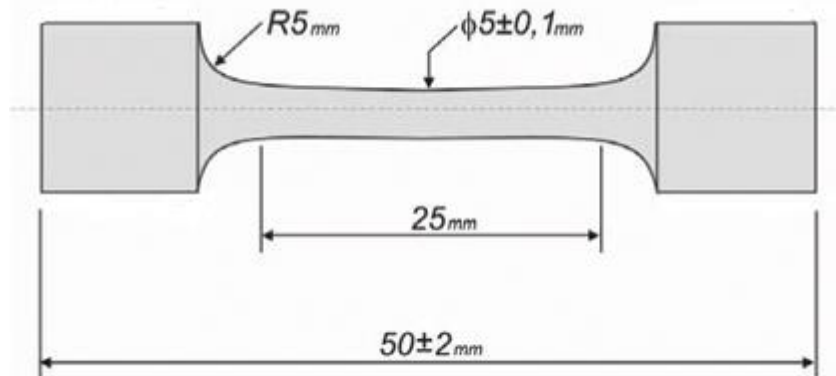
Figura 4: Bloco padrão fundido de acordo com a norma ASTM E8-13.



Fonte: do Autor (2019)

Após a fundição e limpeza, o bloco foi normalizado a temperatura de 950°C, logo, foi retirada a parte útil do bloco padrão, teve a necessidade de executar a usinagem para ficarem cilíndricos e conforme a norma ASTM E8 exige Fig. 5.

Figura 5: Esquema ilustrativo do corpo de prova.



Fonte: ASTM E8 (2013)

3.3 TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIDO

Os tratamentos térmicos aplicados nos corpos de prova, consistiram na temperatura de austenitização que foram calculadas com o auxílio das equações que definem a linha Ac1 e Ac3, conforme Eq. (1) e (2), e levam em consideração a

composição química do material, na qual indicam a temperatura de referência para a austenitização (Peruch, 2009).

Abaixo da temperatura Ac_1 , a transformação não acontece, é recomendado o aquecimento calculado pela linha Ac_3 e com o acréscimo de $50^\circ C$ para total austenitização do material, conforme o diagrama ferro-carbono (KRELLING, 2018).

$$Ac_1 = 723 - 20,7(\%Mn) - 16,9(\%Ni) + 29,1(\%Si) - 16,9(\%Cr) \pm 11,5^\circ C \quad (1)$$

$$Ac_3 = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15,2(\%Ni) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo) \pm 16,7^\circ C \quad (2)$$

Após calculado, a temperatura obtida foi de $839^\circ C$, os corpos de prova foram colocados no forno com uma rampa de aquecimento de $20^\circ C$ por min, e após atingir a temperatura de austenitização permaneceu por cerca de 40 min no forno.

Seguidos do resfriamento de parte das amostras, resfriadas em água e óleo de têmpera em temperatura ambiente, $20^\circ C$ aproximadamente, e também foram resfriados em água pré-aquecida a uma temperatura de $80^\circ C$ aproximadamente. Todos os meios de resfriamento estavam em agitação.

Em seguida, após tratamentos térmicos de têmpera, foi selecionado o melhor meio de resfriamento e foi seguido com o tratamento térmico de revenido, consistindo em três temperaturas, como sendo, $350^\circ C$, $400^\circ C$ e $450^\circ C$, colocados ao forno durante 40 min aproximadamente, logo, retirados e deixados resfriando ao ar naturalmente.

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenido foram realizados no laboratório LAMEF 2 da própria faculdade SATC, em um forno tipo mufla da marca Jung e modelo 2513.

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaio universal EMIC modelo DL 10000 e *software Tesc*, com capacidade de 100 KN, com velocidade de avanço de 5 mm/min. os corpos de prova foram submetidos a tração

na referida máquina para obter os gráficos tensão x deformação, todos os ensaios foram realizados no laboratório LACAMI, da faculdade SATC.

3.4.1 Módulo de Resiliência (Ur)

Resiliência é a capacidade que o material tem de absorver energia, quando sofre deformação elástica, e após o descarregamento tem a sua energia recuperada, voltando ao seu estado original.

Para o cálculo do módulo de resiliência, de acordo com a Eq. (3), que representa a energia de deformação por unidade de volume, para tencionar o material até o limite elástico.

$$Ur = \frac{\sigma_e * \epsilon}{2} \left[N * \frac{mm}{mm^3} \right] \quad (3)$$

Onde:

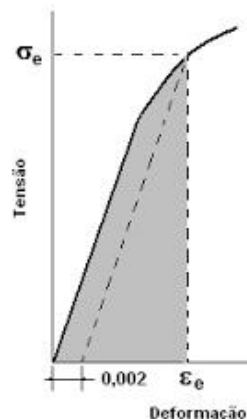
Ur = Módulo de Resiliência [N.mm/mm³]

σ_e = Limite de Escoamento [MPa]

ϵ = Deformação Elástica [mm/mm]

No gráfico Tensão x Deformação, o módulo de resiliência é a área abaixo da curva elástica, com o acréscimo de 0,002 mm/mm de deformação, partindo do seu eixo inicial e traçando uma reta paralela a linha elástica, conforme Fig. 6 abaixo.

Figura 6: Limite de resiliência.



Fonte: Adaptado Callister (2007)

3.4.2 Módulo de Tenacidade (Ut)

Tenacidade é a capacidade que o material tem em absorver energia, antes da sua ruptura. O material capaz de absorver elevadas quantidades de energia nesse regime, é dito como tenaz. Tenacidade é o oposto do material frágil, onde se tem a fratura com pequena absorção de impacto.

A tenacidade pode ser calculada através da Eq. (4) abaixo, e sua unidade de medida é a mesma da resiliência (energia por unidade de volume do material).

$$Ut = \frac{(\sigma_r + \sigma_e)}{2} * \epsilon_f \left[N * \frac{mm}{mm^3} \right] \quad (4)$$

Onde:

Ut = Módulo de Tenacidade [N.mm/mm³]

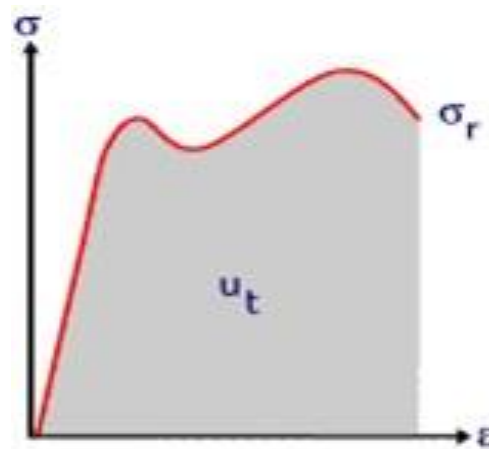
σ_r = Limite de Resistência [MPa]

σ_e = Limite de Escoamento [MPa]

ϵ_f = Deformação Real [mm/mm]

O módulo de tenacidade é representado pela área sob a curva Tensão x Deformação até o ponto de fratura, conforme mostra Fig. 7.

Figura 7: Limite de tenacidade.



Fonte: Adaptado Callister (2007)

3.5 METALOGRAFIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para realizar a metalografia, seguiu-se a norma ASTM E 7-92b, os corpos de prova foram submetidos a preparação metalográfica, que são divididas em etapas: embutir o corpo de prova, lixamento, polimento e análise microestrutural.

Para o lixamento das amostras, utilizou-se as lixas seguintes: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh* – granulometria das lixas. Para fazer um correto processo de lixamento, a cada troca de lixa, as amostras foram posicionadas a 90° dos riscos da lixa anterior, logo vem o polimento utilizando a politriz metalográfica de dois pratos – PL02 ED da marca TECLAGO.

O polimento é necessário para retirar os riscos deixados pela última lixa de 1200 *Mesh*, sendo usado um pano com solução de 10% de alumina para realizar o ensaio metalográfico.

Na caracterização microestrutural utilizou-se um microscópio ótico Olympus BX51M onde se pode observar a metalografia, e que foram realizadas no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI), da faculdade SATC.

As composições químicas foram realizadas em um espectrômetro de massa, modelo SPECTROMAX.

3.6 DUREZA

Para a caracterização da dureza, foi utilizado um durômetro da marca/modelo Mitutoyo HR-400, foi medido em escala Rockwell C (HRc), que utiliza um penetrador tipo: cone de diamante de 120° para as endentações, e para essa escala aplica-se uma carga de 150N, essa escala tem uma faixa de utilização entre 20 a 70 HRc aproximadamente, os ensaios de dureza foram feitos no laboratório LACAMI da faculdade SATC.

3.7 ENSAIO DO DESGASTE ABRASIVO NA RODA DE BORRACHA (AREIA SECA)

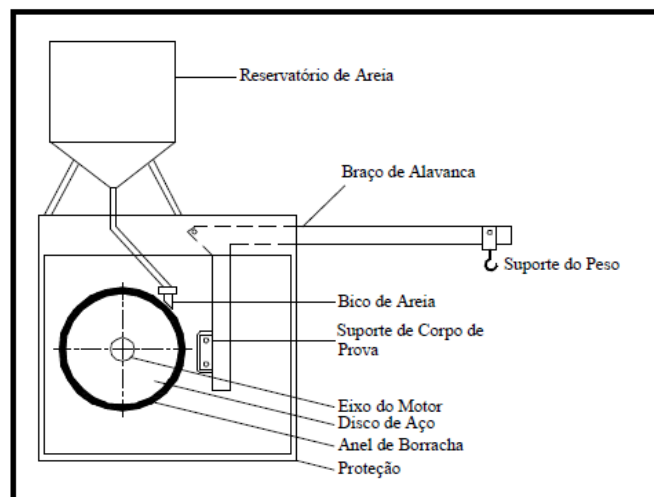
Segundo a norma ASTM G 65, o princípio de funcionamento do equipamento do ensaio de abrasão equivale em desgastar um corpo de prova padronizado, com areia de tamanho de grão e composição controlada. O abrasivo é

colocado entre o corpo de prova e um anel de borracha com dureza conhecida, provocando o riscamento e a remoção de matéria do corpo de prova. Nesse ensaio o corpo de prova é pressionado, por meio de um braço de alavanca com peso especificado, contra a roda de borracha que está girando.

Enquanto isso, o fluxo de areia arranca material da superfície do corpo de prova, com uma vazão de 300 a 400 g/min. A areia utilizada como abrasivo no ensaio foi aquecida em forno a uma temperatura de 130 °C durante 30 min, visando retirar toda a umidade presente, e sua granulometria foi reduzida a 0,35 mm com a utilização de peneiras apropriadas.

A Fig. 8 mostra o esquema simplificado do equipamento utilizado para realizar os testes abrasivo.

Figura 8: Esquema simplificado do equipamento.



Fonte: ASTM G 65 (2000)

Segundo a norma Standard ASTM G 65-00, os aços temperados se enquadram no procedimento A, onde a areia agirá como material abrasivo em atrito contínuo entre o disco e o corpo de prova durante 30 min, com uma força atuante pelo braço de carga de 130 N, o disco revestido de borracha trabalha com 200 rpm de rotação, gerando aproximadamente uma abrasão linear de 4309 metros.

Os corpos de provas são pesados antes e depois do ensaio e a perda de massa é determinada. Para possibilitar a comparação entre vários metais, torna-se necessário converter a perda de massa para perda de volume Eq. (5) em milímetros cúbicos, devido à grande diferença nas densidades dos materiais.

Todos os ensaios de abrasão foram executados no laboratório LAVITRI da faculdade SATC.

$$Vl = \frac{Lm}{\rho} * 1000 [mm^3] \quad (5)$$

Onde:

VI = Perda de Volume [mm³]

Lm = Perda de Massa [g]

ρ = Densidade [g/cm³]

Tambem utiliza-se a equação adaptada de Archard Eq. (6) para calcular o coeficiente de desgaste K.

$$K = \frac{Vl}{N*L} \left[\frac{mm^2}{N} \right] \quad (6)$$

Onde:

K = Coeficiente de Desgaste [mm²/N]

VI = Perda de Volume [mm³]

N = Carga Aplicada [N]

L = Distância Percorrida [mm].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a conclusão de todos os ensaios realizados nos laboratórios da faculdade SATC, foi realizado a compilação dos resultados para a análise de qual temperatura de revenido o material apresenta maior resistência ao desgaste abrasivo.

4.1 ANÁLISE DO MATERIAL ATUALMENTE EMPREGADO NA EMPRESA

Após adquirir uma capa de dente na empresa, com sua vida útil já excedida, foram realizadas algumas análises em laboratório.

A composição química descrita na Tab. 2 que após realizada, segundo norma, se enquadrou no aço ASTM SC 4320.

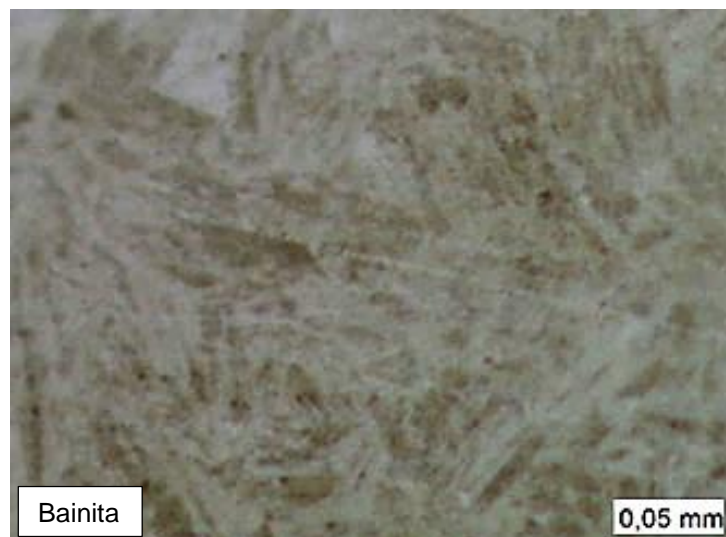
Tabela 2: Composição Química Capa do Dente.

% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cr	% Mo
0,24	1,19	0,015	0,008	0,43	0,85	0,17

Fonte: do Autor (2019)

Também foi realizada a metalografia, para melhor entendimento sobre o material usual a ser estudado, conforme mostra a Fig. 9.

Figura 9: Microestrutura da capa do dente atual.



Fonte: do Autor (2019)

Em seguida foi realizado o ensaio de dureza, que após três endentações, apresentou uma média de 41,3 HRc, e por fim, foi realizado o ensaio de desgaste abrasivo na roda de borracha, que será apresentado a perda de volume nos seguintes capítulos.

4.2 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SC 1045 FORNECIDO

O fornecedor responsável pela fundição dos blocos padrão usado para confecção dos corpos de prova, apresentou o material com a seguinte composição química, Tab. 3.

Tabela 3: Composição química do aço 1045 fornecido.

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0,49	0,73	0,02	0,02	0,50

Fonte: do Autor (2019)

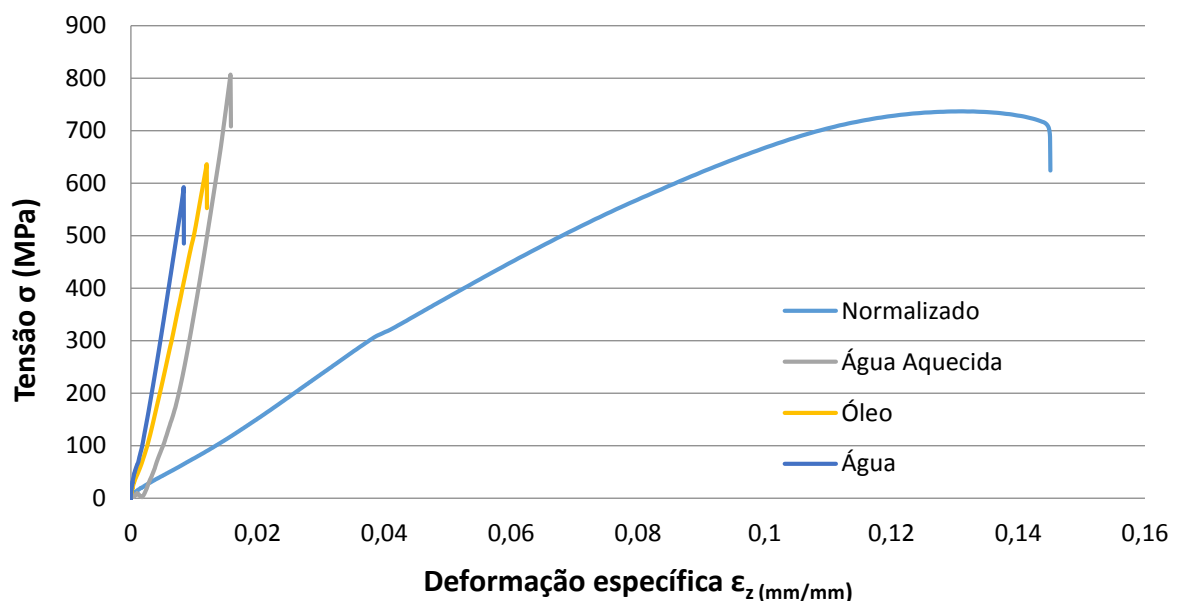
Observando a composição química apresentada pelo fabricante, verifica-se que está de acordo com a norma ASTM A 958, e pode seguir para tratamentos desejados.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO (TENSÃO X DEFORMAÇÃO)

Nesta etapa, após os corpos de prova já terem passado pelos seus respectivos tratamentos térmicos, foram sujeitos ao ensaio de tração, para análises de tensão máxima de ruptura, tensão de escoamento, alongamento, limite de resiliência e limite de tenacidade.

A Fig. 10 apresenta o gráfico tensão x deformação do corpo de prova normalizado e dos corpos de prova apenas com o tratamento térmico de têmpera, sendo eles resfriados em água a temperatura ambiente, a óleo de têmpera e por fim em água pré-aquecida a 80°C aproximadamente.

Figura 10: Tensão x Deformação normalizado e temperados.



Fonte: do Autor (2019)

Observando a Fig. 10, nota-se a fragilidade em função da têmpera, os corpos de prova resfriados em água a temperatura ambiente apresentaram trincas após o tratamento, conforme mostra Fig.11.

Figura 11: Corpo de prova temperado em água.

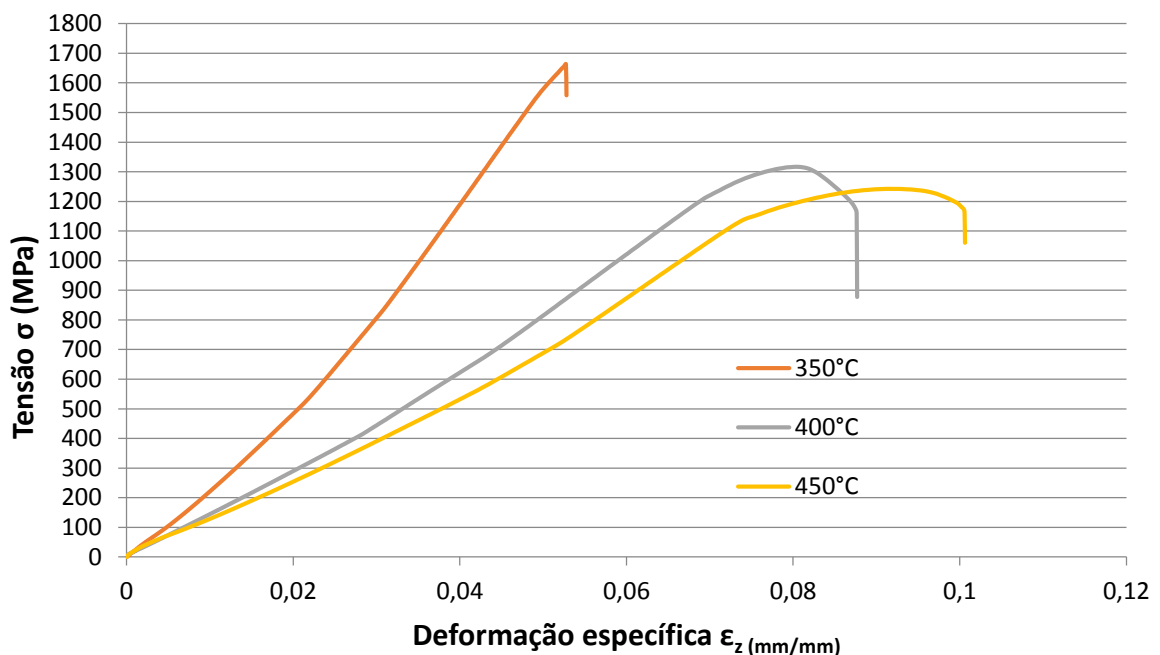


Fonte: do Autor (2019)

Entre os meios de resfriamento realizados, seguiu-se para o tratamento térmico de revenido, os corpos de provas temperados em água aquecida, pois apresentaram a maior tensão em comparativo ao resfriado em óleo de têmpera.

O revenido consistiu em três temperaturas, como sendo: 350 C, 400 C e 450 C. Após esses tratamentos concluídos, realizou-se novos ensaios de traço conforme mostra Fig. 12 do gráfico obtido.

Figura 12: Tensão x Deforma o revenidos.



Fonte: do Autor (2019)

De acordo com o gráfico mostrado na Fig. 12, pode-se observar que, com o revenimento a 350°C o material se encontra frágil e com baixo escoamento. Quanto maior a deformação específica, maior o seu limite de resiliência e tenacidade. Foram calculadas as tensões máxima, tensão de escoamento, limites de resiliência e limites de tenacidade conforme apresenta os resultados na Tab. 4.

Tabela 4: Cálculo tensões resiliência e tenacidade.

Ensaio	Tensão Máxima σ Máx [MPa]	Tensão Escoamento σ_e [MPa]	ϵ [mm/mm]	ϵ_f [mm/mm]	Ur [Nmm/mm ³]	Ut [Nmm/mm ³]
Revenido 350°C	1662,30	1636,70	0,048	0,053	39,28	87,42
Revenido 400°C	1316,24	1238,31	0,071	0,088	44,08	112,40
Revenido 450°C	1242,33	1177,27	0,078	0,100	45,97	120,98

Fonte: do Autor (2019)

Conforme dados da Tab. 4, o revenido a 400°C apresentou uma variação de 22,2% a mais em seu módulo de tenacidade, em comparação com o revenido a 350°C, já a temperatura de 450°C em relação ao revenido a 400°C, apresentou uma variação de 7,1%.

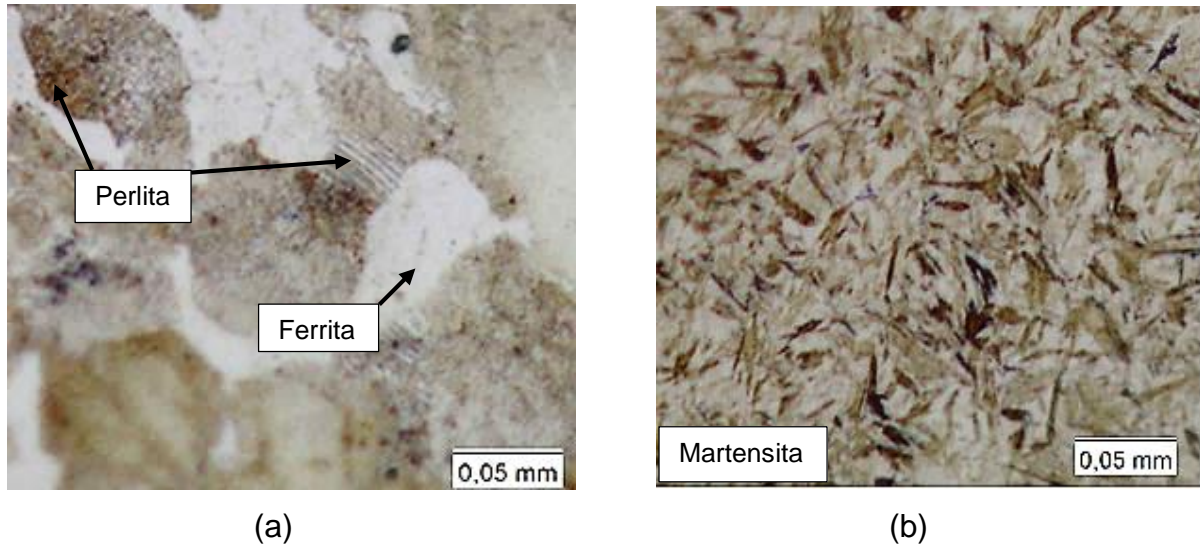
Segundo a norma ASTM A 958 recomenda-se seguir a classe 90/60, que tem como aplicações o uso de peças para tratores, roletes, cunhas de fricção de equipamentos ferroviários, sapatas para movimento de terra, penetradores de solo, entre outros. Utilizando os parâmetros da norma, obtém-se um módulo de tenacidade mínimo de 93,15 N*mm/mm³.

4.4 METALOGRAFIAS

Foram analisadas as microestruturas das amostras, com o material normalizado, temperado em água pré-aquecida, e com as três temperaturas de revenido, para ter um melhor entendimento sobre suas transformações micro estrutural no pós tratamento térmico.

A Fig. 13 representa a microestrutura do corpo de prova ASTM SC 1045 normalizado e temperado apenas.

Figura 13: Análise das microestruturas dos corpos de prova, ampliação 500x. (a) normalizado. (b) temperado em água aquecida.

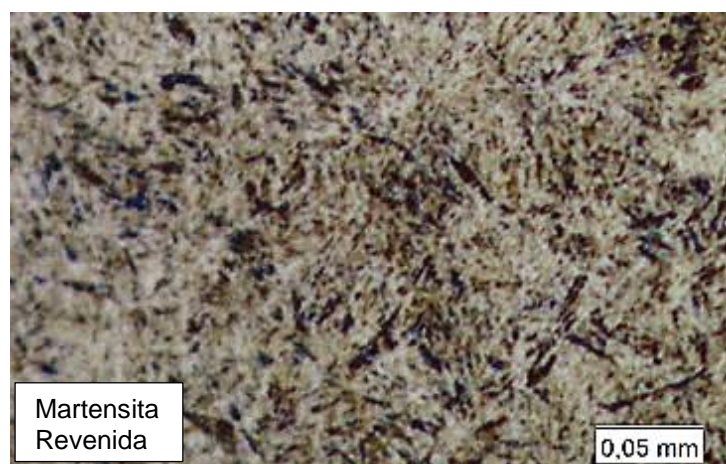


Fonte: do Autor (2019)

Conforme Fig. 13 pode-se observar a mudança causada pela têmpera, contendo na microestrutura do normalizado (a) ferrita, perlita e lamelas de cementita, que é comum nos materiais sem tratamento térmico de têmpera, já na microestrutura do temperado (b), possui martensita acicular em formato de agulhas, que são de extrema dureza e frágeis, típico do material temperado.

Já a Fig. 14, representa a Microestrutura do mesmo material após o tratamento térmico de revenido a 350°C.

Figura 14: Microestrutura após revenimento a 350°C ampliação 500x.

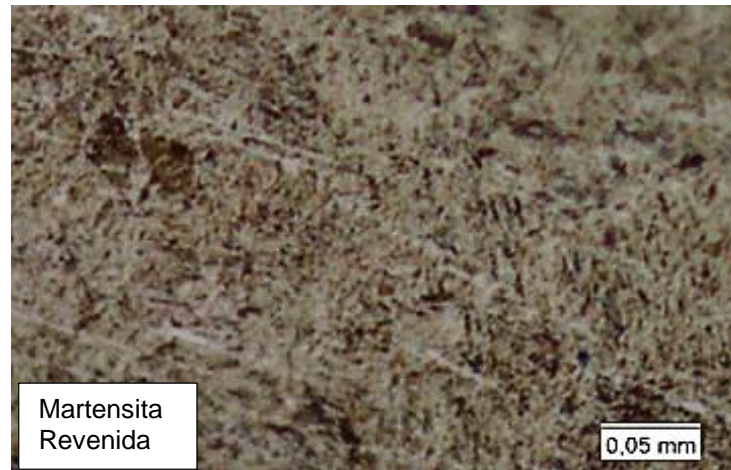


Fonte: do Autor (2019)

De acordo com a Fig. 14, apresenta-se lâminas dispersas de martensita revenida com estrutura acicular mais definida, e também martensita revenida com estrutura acicular menos definida.

A Fig. 15 apresenta a microestrutura com revenido a 400°C.

Figura 15: Microestrutura após revenimento a 400°C ampliação 500x.

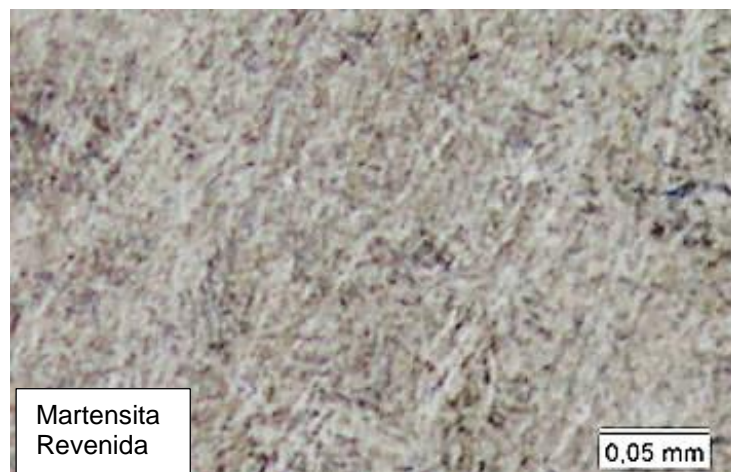


Fonte: do Autor (2019)

Conforme Fig. 15, a 400°C sua microestrutura apresenta martensita revenida, estrutura acicular menos definida e pouco dispersos.

Por fim, a Fig. 16 apresenta a microestrutura com revenido a 450°C.

Figura 16: Microestrutura após revenimento a 450°C ampliação 500x.



Fonte: do Autor (2019)

Com essa temperatura de revenido Fig. 16, a microestrutura revelada é composta de carbonetos (pontos esbranquiçados) na matriz de martensita revenida.

4.5 DUREZA (HRc)

Dentre os ensaios realizados, foram executadas três endentações com o durômetro em escala HRc em cada corpo de prova, assim, obtendo a média aritmética em cada um, mostrado na Tab. 5.

Tabela 5: Durezas obtidas (HRc).

ASTM SC 1045	Endentação				
	1°	2°	3°	Média	Desvio padrão
Normalizado	8	9	10	9	0,5
Temp. Água aque.	53	56	55	55	1,0
350°C	50	50	52	51	0,9
400°C	44	46	46	45	0,8
450°C	42	41	41	41	0,2

Fonte: do Autor (2019)

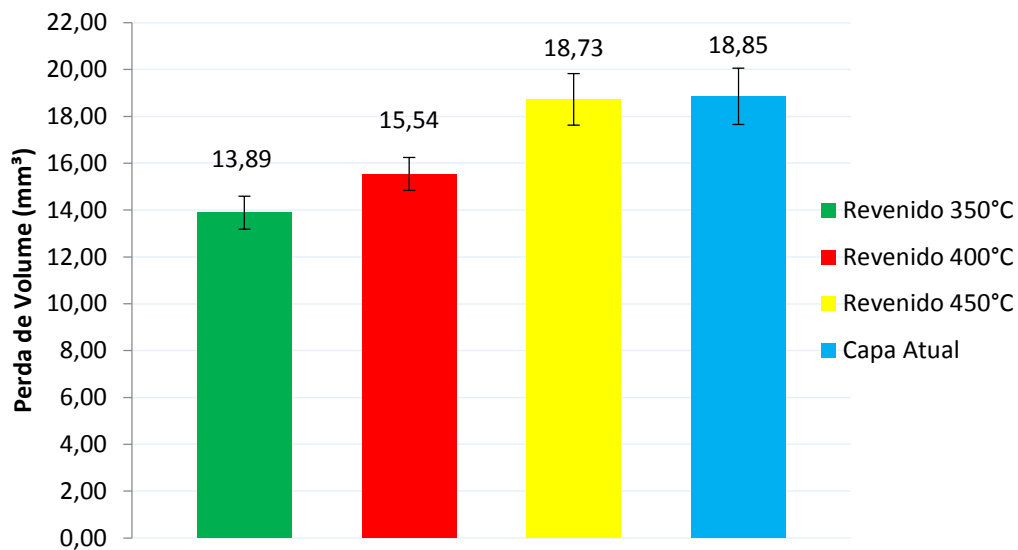
Conforme Tab. 5, em relação ao corpo de prova temperado, pode-se observar que, com a variação de 50°C na temperatura de revenido, a dureza variou cerca de 5 HRc aproximadamente.

4.6 ENSAIO COMPARATIVO DO DESGASTE EM ABRASÔMETRO

Após os tratamentos térmico realizados, os corpos de prova do ensaio abrasivo foram sujeitos ao desgaste na máquina por 30 min, obedecendo todos os parâmetros da norma ASTM G 65-00, que equivalem a 4309 metros lineares.

Com os testes realizados, a Fig. 17, apresenta os resultados dos respectivos valores da perda de volume dos corpos de prova, incluindo a capa de dente atual usada na empresa.

Figura 17: Gráfico perda de volume (mm³).



Fonte: do Autor (2019)

Observando o gráfico da Fig. 17, em comparativo com a capa de dente atual, o revenido a 350°C apresentou 26% a mais, na capacidade de resistência ao abrasivo, já a 400°C, apresentou 18%, e a 450°C, 0,64% apenas. Levando em consideração a aplicação para capas de dente, o que melhor se enquadrou foi o revenido a 400°C, pois obteve a tenacidade necessária e boa resistência ao abrasivo em comparação a capa de dente atual.

Abaixo Tab. 6, obteve-se o coeficiente de desgaste K dos corpos de prova, com o auxílio da equação adaptada de Archard.

Tabela 6: Coeficiente de desgaste.

Coeficiente de Desgaste K [mm ² /N]	
Revenido 350°C	$2,48 \times 10^{-8}$
Revenido 400°C	$2,77 \times 10^{-8}$
Revenido 450°C	$3,34 \times 10^{-8}$
Capa Atual	$3,37 \times 10^{-8}$

Fonte: do Autor (2019)

Conforme Tab. 6 quanto maior a perda de volume do material, maior será seu coeficiente de desgaste, tendo assim relação com a microestrutura e a dureza do corpo de prova. Com o aumento da temperatura, desestabiliza a fase martensita dando início a precipitação do carbono e crescimento do grão tornando o material menos resistente ao abrasivo.

5. CONCLUSÃO

- Após a conclusão de todos os testes práticos, pôde-se observar o quanto o tratamento térmico tem influência sobre a microestrutura e propriedade mecânica, sendo desde o meio de resfriamento, até as pequenas variações nas temperaturas de revenido;
- Na têmpera, a microestrutura apresentou martensita acicular em formato de agulhas, tendo a maior dureza, porém, o material apresenta-se muito tencionado e frágil, necessitando do revenimento para alívio de tensões;
- Quanto maior a temperatura de revenido, maior a dispersão da martensita em sua microestrutura, dando início a precipitação do carbono e crescimento do grão;
- Para a aplicação de capas de dente tem um parâmetro de tenacidade a ser seguido, exigido pela norma ASTM A 958 classe 90/60, sendo os revenidos a 400 e 450°C os que obtiveram a tenacidade necessária para essa aplicação.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a conclusão deste trabalho é possível sugerir indicações para trabalhos futuros, como sendo:

- Viabilidade econômica do projeto;
- Estudo da fragilidade ao tratamento térmico de revenido;
- Ensaio de impacto.

Agradecimentos

Agradeço os professores orientadores, Me. Reginaldo Rosso Marcello em conjunto com Me. Fábio Peruch por todo conhecimento e apoio no desenvolvimento do trabalho, a o Emerson Gonçalves por ceder os blocos fundidos e também a todas as pessoas que estiveram do meu lado nesta etapa.

6. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, Rafael. **Tratamento Térmico**. 2016. Disponível em: <<https://mecanicafacil-ra.blogspot.com/2016/12/tratamento-termico-tempera.html>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

ASTM A 958: Standard Specification for Steel Castings, Carbon and Alloy, with Tensile Requirements, Chemical Requirements Similar to Standard Wrought Grades1. United States: ASTM, 2000.

ASTM E8: Standard Test Methods for Metallic Tensile Testing1. United States: ASTM, 2013.

ASTM. E 7-92B: Standard Terminology Relating to Metallography. United States: ASTM, 2002.

ASTM G65: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Philadelphia ASTM, 2000.

ASTM G40: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. United States: Astm, 2017.

BAPTISTA, A. L. DE B., NASCIMENTO, I. DE A. DO – “Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas”. Rio de Janeiro 1999.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2007.

CHIAVERINI, A. **Aços e Ferros fundidos**. 4. ed. São Paulo: Editora ABM, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2008.

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica. **Revenimento**. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6448-revenimento#.XZjLx1VKjIU>. Acesso em: 05 out. 2019.

De MELLO, J. D. B. “Introdução ao estudo de desgaste”. UFSC. 1994.

DEUS, Gustavo Portela de. Análise e avaliação dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários após revestimento. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-rn, 2008.

DIN 50320: Verschleib – “Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes”. Beuth Verlag, Berlin 1979.

FERMAC. **Tratamento Térmico de Revenido**. Disponível em: <<http://tratamentotermico.com/index.html>>. Acesso em: 05 out. 2019.

FERNANDES, Viviane Kettermann; MARTENDAL, Caroline Pereira. “Desgaste e seus mecanismos”. 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

FIGUEIREDO NETO, João José de. Projeto, Fabricação e Validação de um Abrasômetro Roda de Borracha na Configuração Horizontal e Vertical. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017

INFOMET. **Aços Fundidos**. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=14>>. Acesso em: 18 set. 2019.

KRELLING, A. **Tratamentos Térmicos e Termoquímicos**, Disponível em: <http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/T%C3%A9rmico%20em%20Mec%C3%A2nica%20Integrado/TTT/2%20%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos%20e%20Termoqu%C3%ADmicos.pdf>. Acessado em 11 de outubro de 2019.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 1045 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. 2017. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 16 out. 2019.

MACHADO, P. **Resistência a Abrasão de Aços Hadfield**, 2015. Disponível em <[http://tricorrrmat.ufes.br/sites/tricorrrmat.ufes.br/files/field/anexo/Paulo%20Machado%20\(UFPA\).pdf](http://tricorrrmat.ufes.br/sites/tricorrrmat.ufes.br/files/field/anexo/Paulo%20Machado%20(UFPA).pdf)> Acesso em 09-06-2019.

MARTINS, José Lucas Pessoa. Avaliação da Molhabilidade e Resistência ao Desgaste Abrasivo de Compósito do Tipo Epóxi/Quasicristais AlCuFe. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MEDEIROS, Alberi. **Tratamento Térmico**. 2013. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAfNulAG/tratamentos-termicos-acos-materiais>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

MAXITRATE. **Tratamento Térmico**. [S. l.], 1992. Disponível em: <http://www.maxirate.com.br/empresa.html>. Acesso em: 15 jun. 2019.

PERUCH, F, 2009, Influência do Ciclo de Recozimento Para Esferoidização nas Propriedades Mecânicas do Aço ABNT 5160”. Porto Alegre: PPGEM.

SANTOS, Francisco Sinderlan dos. Modelagem por Elementos Finitos do Sistema de Amplificação de Usinagem de um Equipamento por Abrasão. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SCAVONE, Luiz. Tratamento Térmico. Itatiba - Sp: Cleide Aparecida da Silva, 2000.

SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo. **Aços e ligas especiais**. Sumaré Sp: Homart, 1995.

SENAI-SP. Processos de fabricação, módulo: tratamento térmico. v. 5. São Paulo. Apostila, 2011

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Blucher, 2012.

TUBONASA. **Aço Carbono**. Disponível em: <<https://tubonasa.com.br/noticias/aco-carbono-tudo-o-que-voce-precisa-saber>>. Acesso em: 18 set. 2019.

UNICATRATORES. **Dentes para concha de escavadeiras**. Disponível em : <https://www.unicatratores.com.br/dentes-concha-escavadeira>. Acesso em 01 de abril de 2019.

ZUM GAHR, K. H. **Microestrutture and wear of materials**. Amsterdã: Elsevier, 1987.

LISTA DE SÍMBOLOS

Ur	[N.mm/mm ³]	Módulo de Resiliência
ϵ	[mm/mm]	Deformação Elástica
Ut	[N.mm/mm ³]	Módulo de Tenacidade
σ	[MPa]	Limite de Resistência
σ_e	[MPa]	Limite de escoamento
ϵ_f	[mm/mm]	Deformação Real
Mi	[g]	Massa Inicial
Mf	[g]	Massa Final
ρ	[g/cm ³]	Densidade
K	[mm ² /N]	Coeficiente de desgaste
V	[mm ³]	Volume
N	[N]	Carga aplicada
L	[m]	Distância percorrida