

ESTUDO DE DESGASTE ABRASIVO DO MATERIAL ASTM SC 4140 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÕES EM ESCAVADEIRA DE MINERAÇÃO

Mateus Scopel¹

Reginaldo Rosso Marcello²

Fábio Peruch³

Resumo: o elevado desgaste de material dos elementos de penetração do solo ocorre principalmente pelo desgaste abrasivo. O objetivo principal desse trabalho é analisar a resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão das capas de dentes das conchas de escavadeiras hidráulicas utilizadas para o carregamento de rochas. O aço ASTM SC 4140 foi adotado para a realização desse estudo por ser um aço de médio teor de carbono com adição de cromo-molibdênio que tem como finalidade melhorar suas propriedades mecânicas como capacidade de endurecimento, tenacidade, resistência ao desgaste. As amostras foram fabricadas a partir do processo de fundição em um bloco padrão conforme norma ASTM E8-13a onde posteriormente foi realizado o tratamento térmico de têmpera a uma temperatura de 859°C de patamar, seguido de quatro meios de resfriamentos. Após o processo de tratamento térmico de têmpera foi adotado as amostras resfriadas em óleo aquecido para prosseguir com o revenimento que foi realizado em três temperaturas, 350, 400 e 450°C. Os ensaios de dureza mostram que com o aumento da temperatura de revenido ocorre uma queda substancial da dureza e de seu limite de escoamento devido à mudança na sua microestrutura, os ensaios de desgaste mostram que a amostra revenida a 350°C foi a que teve a menor perda de volume associado a uma maior dureza decorrente de sua microestrutura.

Palavras-chave: ASTM SC 4140. Desgaste abrasivo. Têmpera e revenimento.

1. INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil é responsável por quase 5 % do PIB nacional, oferecendo produtos para variados tipos de indústrias tais como, siderúrgicas, fertilizantes, petroquímicas e metalúrgicas (VALE, 2017).

As rochas são amplamente utilizadas nas construções em obras de engenharia e na indústria. Podendo ser utilizada para confecção de concreto,

¹ Mateus Scopel. E-mail: mateus__scopel@hotmail.com.br

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

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

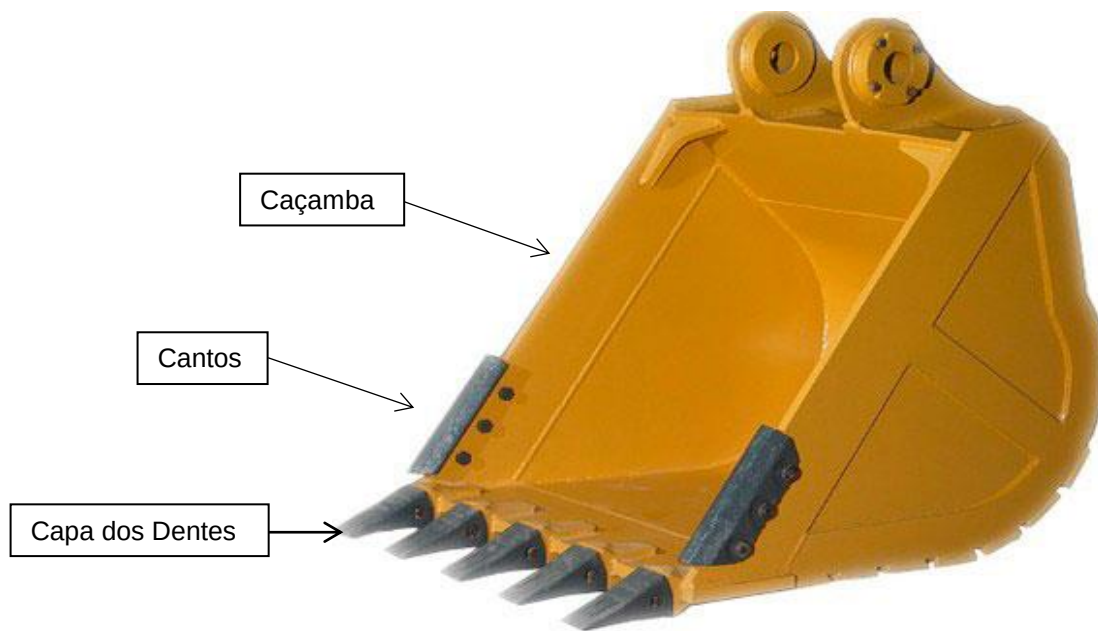
proteção de taludes de barragens, pedra britada para leito de ferrovias, rodovias e aeroportos (CHIOSSI, 2013).

A utilização de equipamentos rodoviários para escavação e transporte está crescendo cada vez mais, devido à necessidade de se escavar e deslocar grandes quantidades de materiais e um menor tempo.

Um dos elementos de maior desgaste dos equipamentos de construção e mineração são as ferramentas de penetração no solo, que estão entre elas os dentes, pontas, cantos, entre outros.

A Fig. 1 apresenta os principais componentes de uma cocha de escavadeira hidráulica.

Figura 1: Concha Escavadeira.



Fonte: Adaptado de Única tratora (2019)

Observando a Fig. 1, pode-se verificar que as capas dos dentes e os cantos são os principais elementos que estão sujeitos a severos desgastes abrasivos por estarem constantemente em contato com o solo durante a escavação.

O elevado desgaste de material dos elementos de penetração do solo de equipamentos rodoviários ocorre principalmente, pelo tipo de terreno, mineral presente, resistência litológica. A vida útil e os rendimentos desses elementos estão

diretamente relacionados à composição da liga constituinte do material utilizado e dos processos de tratamento térmico que foram aplicados na fabricação do material.

Já se tratando de elementos de penetração no solo a perda de massa desses elementos é provocada quase que exclusivamente pelo desgaste abrasivo, que é provocado pelo próprio material ou carga que o equipamento será solicitado, pelo contato com esse material e pelo movimento relativo entre as partes envolvidas no sistema.

Devido à alta taxa de desgaste e a reposição constante destes itens o uso de ferramentas de penetração de baixa qualidade pode acarretar ao longo do tempo, grandes prejuízo para a empresa.

Os dentes da concha de escavadeiras hidráulicas que atuam em mineração estão constantemente em contato com o solo abrasivo, gerando assim desgastes significativos e com elevados custos de manutenção (ALBERTIN, 2003). A Fig. 2 mostra uma capa de dente antes do desgaste (a) e outra após o desgaste (b).

Figura 2: a) Capa do dente sem desgaste, b) Capa do dente após desgaste.



Fonte: do autor (2019)

Empresa de britagem de rocha situada em Nova Veneza trabalha diariamente com uma escavadeira hidráulica Caterpillar 315DL para fazer o carregamento das rochas em caminhões.

Por ser um material de alta abrasão, as capas dos dentes duram em média 140 horas de trabalho, sendo que cada troca se faz necessário à substituição das seis capas do dente que compõe a concha e seus elementos de fixação.

As vantagens proporcionadas por esse estudo podem identificar qual o melhor meio de resfriamento de têmpera, e temperatura de revenimento do material ASTM SC 4140 para melhorar as características do material a ser utilizado para esta finalidade, podendo assim, aumentar a vida útil desse componente.

O estudo tem como principal objetivo avaliar a resistência ao desgaste abrasivo dos corpos de prova através do ensaio de roda de borracha seca conforme a norma ASTM G65 - 00. Estas análises serão efetuadas após os corpos de prova do material SC 4140, serem tratados termicamente pelo processo de têmpera e posteriormente de revenimento em diferentes temperaturas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESGASTE

Segundo Hawk (1999), o desgaste é um dos maiores problemas que ocorrem em escavações, movimentações de terra, minerações e processamento de minerais, podendo ocorrer em uma variedade de equipamentos como dentes escavadores e lâminas de escoamento. O desgaste das peças, somado com o custo de reparo significam elevados gastos para as empresas.

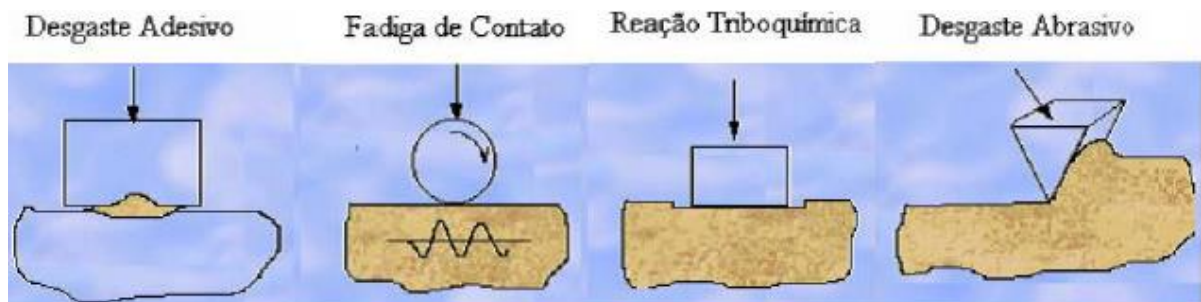
De acordo com Baptista, Nascimento (1999), a resistência ao desgaste é considerada como parte de um sistema tribológico sendo que os principais parâmetros que influenciam na taxa de desgaste, inclui as características de projetos, condições de operação, tipo de abrasivo e propriedades do material.

Nas indústrias, o desgaste abrasivo é o que apresenta a maior perda dentre as outras formas de desgastes, gerando prejuízos significativos, fatores que evidenciam essa observação é a contaminação por partículas abrasivas em equipamentos mecânicos que estão relacionados a movimentação de minerais.

Segundo Tassi (2010), os mecanismos de desgaste pode ser divididos em quatro grupos distintos: adesão, fadiga de contato, reação triboquímica e abrasão, sendo o foco deste estudo o desgaste abrasivo.

A Fig. 3 mostra esquematicamente esses principais tipos de desgastes.

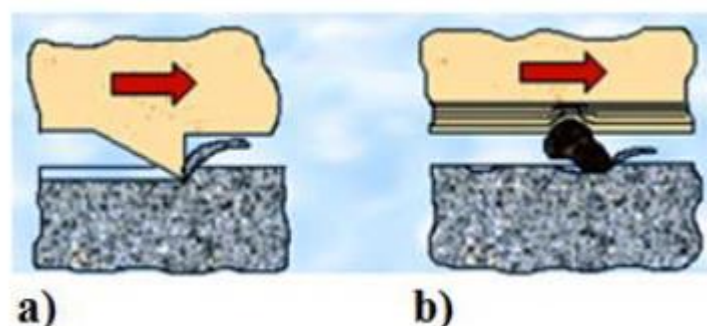
Figura 3: Mecanismos de Desgaste



Fonte: Adaptado Koning (2007)

Segundo, Souza, (2002) *apud* Portela, (2008), abrasão a dois corpos é quando uma ou mais partículas de elevada dureza são atritadas contra uma superfície, sulcando-a devido a força normal aplicada. Já a abrasão a três corpos se dá quando partículas ficam aprisionadas entre duas superfícies que deslizam entre si, estando livre para se movimentar. A Fig. 4 mostra esquematicamente esses dois tipos.

Figura 4: Classificação do desgaste abrasivo: (a) abrasão entre dois corpos, (b) abrasão entre três corpos.



Fonte: Adaptado Koning (2007)

2.2 AÇO CARBONO E AÇO LIGA

De acordo com Pannoni (2005) os aços podem ser classificados conforme uma distinção entre aço carbono e aços ligados. Aço-carbono é uma liga Ferro-Carbono contendo geralmente de 0,008% até 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes do processo de fabricação.

O aço carbono pode ainda ser dividido em três categorias: baixo (< 0,3%), médio (> 0,3 a < 0,7%) e alto (> 0,7%) teor de carbono.

Visando melhorar as propriedades mecânica dos aços carbono, podem ser adicionados outros elementos na sua composição, tais como: cromo, molibidênio, níquel, boro, manganês, titânio, entre outros. Sendo assim caracterizados como aços ligados. (SOUZA, 2008).

O aço SAE 4140 é um aço ligado ao cromo-molibdênio. O cromo tem como finalidade melhorar a resistência, a ductilidade, tenacidade, resistência ao desgaste e a capacidade de ser endurecido. O molibdênio, em combinação com o cromo, reduz fragilidade, acrescenta dureza e aumenta a tenacidade (CASTRO, 2013).

A Tab. 1 apresenta a composição química do aço SC 4140, de acordo com a norma ASTM A 958.

Tabela 1: Composição química do aço ASTM SC 4140 em (%):

C	Mn	P _{máx}	S _{máx}	Si	Cr	Mo
0,38/0,43	0,70/1,10	0,035	0,04	0,30/0,60	0,80/1,10	0,15/0,25

Fonte: ASTM A 958 (2000).

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico são operações de aquecimento e resfriamentos, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, e tem como principal objetivo alterar as propriedades dos aços para adquirir características determinadas (BAPTISTA, NASCIMENTO, 1999).

Os principais tratamentos térmicos citados por Costa e Silva, (1988) são recozimento, normalização, têmpera, revenimento. Onde os três primeiros envolve a

transformação de fase a partir da austenita podendo assim obter desde o máximo de ductilidade e mínimo de dureza, características das estruturas ferríticas, até elevados valores de dureza e menor ductilidade associados à martensita.

De acordo com Chiaverini, (2005) os principais objetivos dos tratamentos térmicos são: remoção de tensão, aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora na ductibilidade e melhora na resistência ao desgaste.

2.4 TRATAMENTO DE TÊMPERA

Uma das principais características dos aços como materiais de construção mecânica, é a possibilidade de desenvolver combinações entre resistência e tenacidade. A têmpera consiste em aquecer o aço, até ele atingir a temperatura de austenitização seguindo de um resfriamento em uma velocidade suficientemente rápida para evitar transformações perlíticas e bainíticas na peça, visando obter estrutura martensítica (COSTA e SILVA, 1988).

Segundo Chiaverini, (2005), os meios de resfriamento utilizados dependem de endurecibilidade dos aços como teor de carbono, elementos de liga, da forma e dimensão da peça a ser submetida a têmpera, onde os meios mais utilizados para o resfriamento são: óleo, água e ar.

2.5 TRATAMENTO DE REVENIMENTO

O revenimento é um tratamento térmico que geralmente acompanha a têmpera, eliminando assim os maiores inconvenientes produzidos na mesma. Além disso, elimina e remove tensões internas, corrige excessivas durezas e fragilidade do material visando aumentar sua ductilidade e resistência ao choque (CHIAVERINI, 2005).

Costa e Silva, (1988), ressalta, que este procedimento consiste em aquecer uniformemente até uma temperatura abaixo da austenitização, mantendo nesta temperatura por um tempo para a equalização da temperatura em toda extensão da peça, para obtenção das propriedades desejadas.

2.6 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Resiliência é a quantidade de energia que o material consegue absorver no regime elástico, devolvendo totalmente no descarregamento. O módulo de resiliência é definido como a energia de deformação absorvida por unidade de volume até seu limite de proporcionalidade, sendo acrescentados 0,002 mm/mm paralelo com seu eixo. Segundo Callister (1999), o módulo de resiliência U_r pode ser calculado como:

$$U_r = \frac{\sigma_e \cdot \epsilon}{2} \left[N \cdot \frac{mm}{mm^3} \right] \quad (1)$$

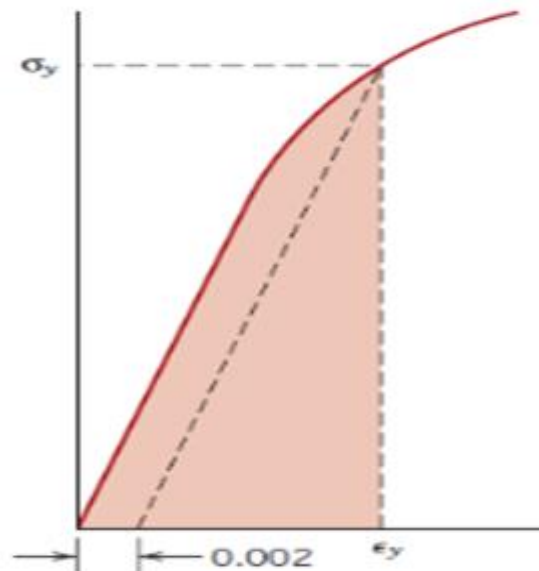
Onde:

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

σ_e = Limite de Escoamento [MPa]

ϵ = Deformação Elástica [mm/mm]

Figura 5: Gráfico resiliência.



Fonte: adaptado Callister (2007)

A resiliência é representada pela sua capacidade de absorver energia sem que sofra qualquer dano permanente.

2.7 MÓDULO DE TENACIDADE

Tenacidade é a energia mecânica necessária para levar um material a ruptura, segundo Souza (1992), o módulo de tenacidade pode ser calculado através da Eq. (2). Que é representado pela área sob a curva tensão deformação até o ponto de fratura.

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

Onde:

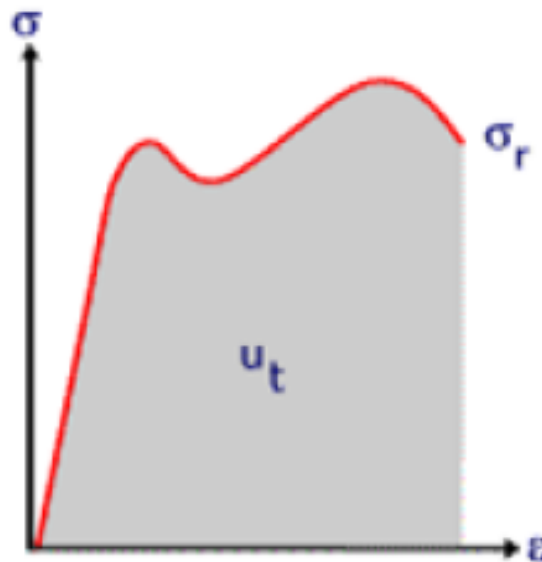
Ut = Módulo de Tenacidade [N.mm/mm³]

σ_r = Limite de Resistência [MPa]

σ_e = Limite de Escoamento [MPa]

ϵ_f = Deformação Real [mm/mm]

Figura 6: Gráfico tenacidade.



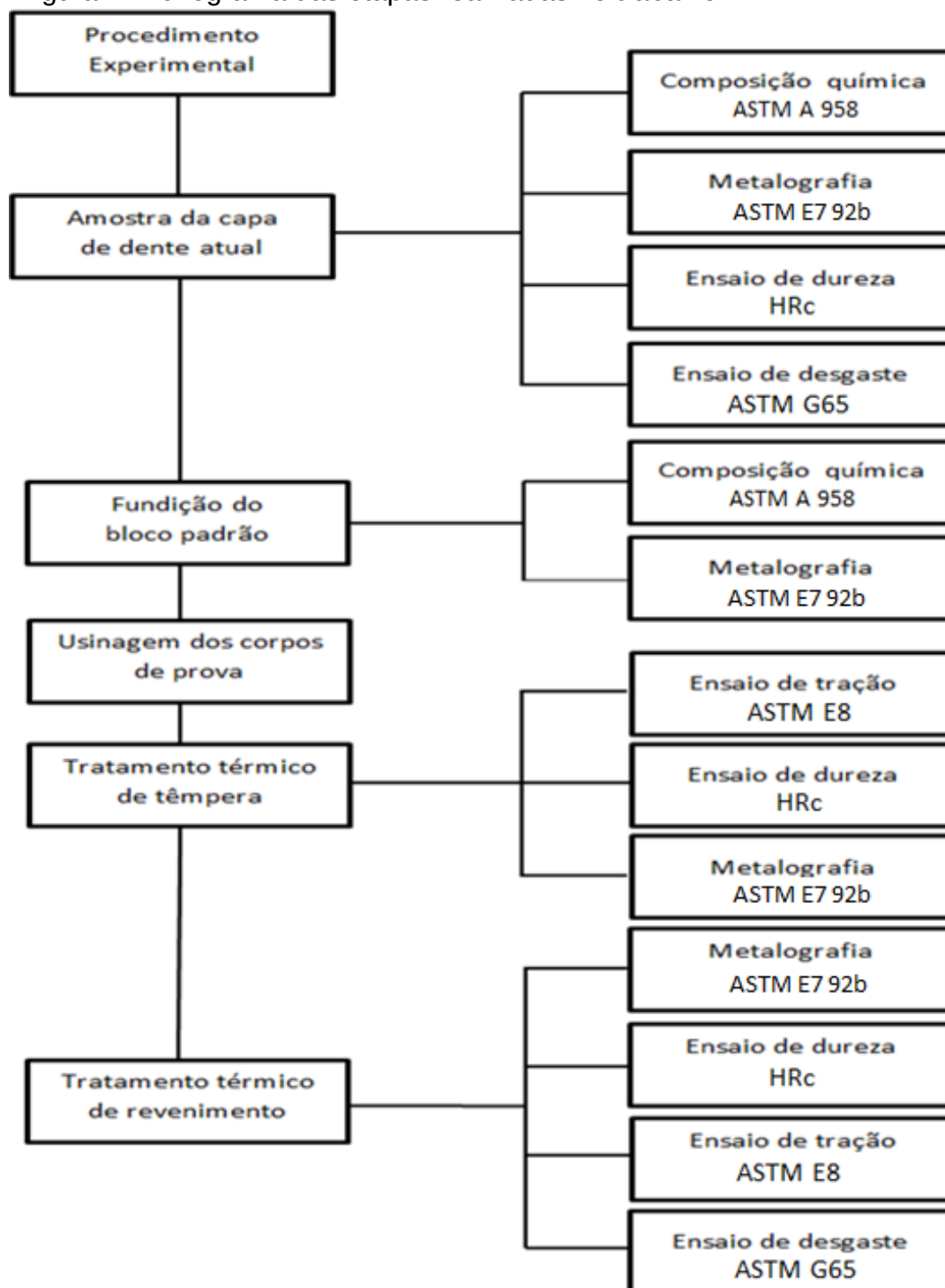
Fonte: adaptado Callister (2007)

Tenacidade é representada pela capacidade de absorver energia na sua deformação plástica.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O fluxograma Fig. 7 a seguir mostra a sequência dos procedimentos experimentais a serem realizados neste trabalho.

Figura 7: Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.



Fonte: do autor (2019)

3.1 ESTUDO DO MATERIAL UTILIZADO

Para que fosse definido o material a ser estudado, foram coletadas informações do material que está sendo utilizado hoje para a fabricação das capas de dente. Foram realizados testes em laboratório como, composição química, metalografia, dureza e desgaste em roda de borracha.

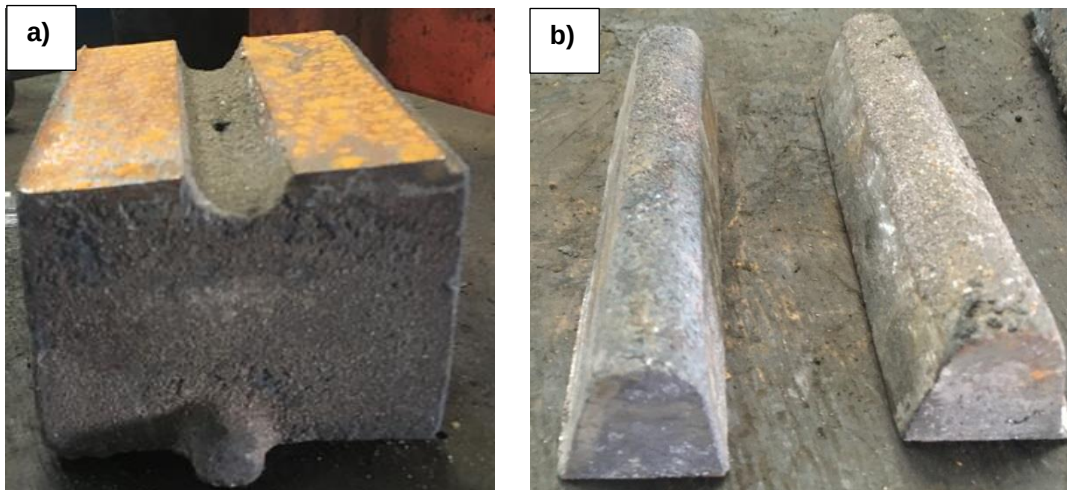
3.2 DEFINIÇÃO DO MATERIAL

Para a fabricação dos corpos de prova foram levados em consideração aços de médio carbono e alta temperabilidade, decidindo-se assim, fabricar os corpos de prova com o aço ASTM SC 4140. O aço ASTM SC 4140, conhecido como aço-cromo-molibdênio, com boa resistência a torção e fadiga, podendo ser utilizadas em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade.

3.3 CORPOS DE PROVA

Para a fabricação dos corpos de prova, foram fundidos blocos padrões seguindo a norma ASTM E8-13a, com o objetivo de se obter um menor número de impurezas nos corpos de prova, após a fabricação dos blocos a parte útil foi cortada. A Fig. 8 mostra o bloco após a fundição.

Figura 8: a) Bloco padrão após o corte, b) Parte útil após o corte.



Fonte: do autor (2019)

Após o corte da parte útil do bloco padrão, foram usinados os corpos de prova de ensaio de tração e para o ensaio de desgaste em roda de borracha.

3.4 TÊMPERA E REVENIMENTO

Para realizar o processo de têmpera, foi necessário determinar as temperaturas de austenitização, foram utilizadas as equações Eq. (3) e Eq. (4), que definem as linhas Ac1 e Ac3 que leva em consideração a composição química do material para determinar a temperatura de austenitização. (PERUCH, 2009)

$$Ac1=723-20,7(\%Mn)-16,9(\%Ni)+29,1(\%Si)-16,9(\%Cr)\pm 11,5^{\circ}C \quad (3)$$

$$Ac3=910-203\sqrt{\%C}-15,2(\%Ni)+44,7(\%Si)+104(\%V)+31,5(\%Mo)\pm 16,7^{\circ}C \quad (4)$$

De acordo com Krelling (2018), o aquecimento de austenitização dos aços hipoeutetóides deve ser de 50°C acima da temperatura encontrada na linha Ac3, pois abaixo da linha Ac3 a ferrita não se transforma totalmente em austenita podendo ocasionar a diminuição da dureza após a têmpera.

Com a utilização das Eq. (3) e (4) Metals handbook (1994), é acrescentado 50°C acima da linha Ac3 encontrou-se uma temperatura de 859°C.

Para a realização da têmpera os corpos de prova foram aquecidos em um forno tipo mufla, a uma taxa de 15°C/min até a temperatura de 859°C e mantido a essa temperatura por 40 minutos, logo após, foram utilizado quatro meios de resfriamentos, água temperatura ambiente, água temperatura aquecida a 80°C, óleo temperatura ambiente e óleo aquecido a 80°C.

Analisando os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova temperados, foi adotado o resfriamento a óleo aquecido, para que fossem prosseguidos os tratamentos de revenimento.

Para realizar o tratamento térmico de revenimento foi utilizado um forno do tipo mufla Jung modelo 2513 onde foram realizados os revenimentos nas seguintes temperaturas: 350°C, 400°C e 450°C.

Foi utilizada uma rampa de aquecimento configurada linearmente a uma taxa de 15°C/min até atingirem a temperatura programada, após atingirem a temperatura, ficaram mantidos por mais 40 minutos.

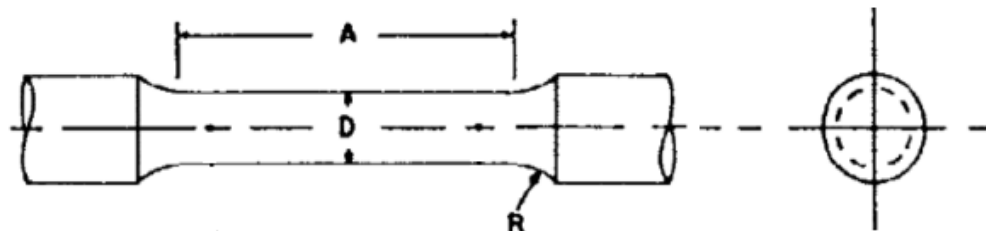
O meio de resfriamento foi à temperatura ambiente para todas as amostras. Os tratamentos térmicos foram realizados no LAMEF- laboratório de metalurgia da engenharia mecânica da Faculdade SATC.

3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaio universal EMIC modelo DL 10000 e *softwareTesc*, com capacidade de 100 KN e com velocidade de avanço de 5 mm/min.

As dimensões utilizadas para a usinagem dos corpos de prova foram conforme norma ASTM E8.

Figura 9: Desenho corpo de prova ensaio de tração.



Fonte: adaptado ASTM E8-13a (2013)

Tabela 2: Dimensões corpo de prova de ensaio de tração.

	A	D	R
Dimensões (mm)	36	8	6,5

Fonte: ASTM E8-13a (2013)

O fator de correção utilizado na montagem dos gráficos se deu com as medidas obtidas pelo software e com as medidas reais do corpo de prova, como forma de corrigir possíveis deslizamentos do corpo de prova com as garras de fixação.

3.6 METALOGRAFIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para realizar a caracterização da metalografia, foram adotados os padrões da norma ASTM E7-92b. Os corpos de prova foram submetidos pela preparação metalográfica que são divididas em quatro etapas: corte da seção, lixamento, polimento e análise microestrutural.

Após o corte das amostras dos corpos de prova foi realizado o lixamento. A granulometria das lixas utilizadas foram as seguintes: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh*. Para fazer um correto processo de lixamento, a cada troca de lixa, as amostras foram posicionadas a 90° dos riscos da lixa anterior.

O polimento é necessário para retirar os riscos deixados pela última lixa de 1200 *Mesh*, sendo utilizada uma politriz com solução de 12% de alumina para posteriormente realizar o ensaio metalográfico.

Na caracterização microestrutural utilizou-se um microscópio ótico Olympus BX51M onde se pode observar a microestrutura. Os ensaios foram realizados no laboratório de caracterização microestrutural LACAMI, da Faculdade SATC.

A composição química foi realizada como um espectrômetro de massa modelo SPECTROMAX.

3.7 ENSAIO DE DUREZA

Para realizar as medições de dureza, foi utilizado um durometro Mitutoyo HR-400, Fig.10 onde a escala de medição utilizada foi Rockwell C (HRC), onde utiliza um penetrador em cone de diamante de 120° e uma força de endentação com 150N.

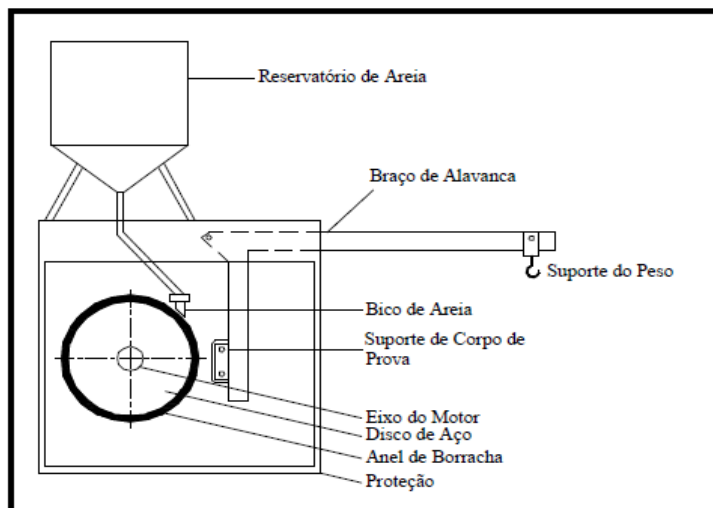
Os ensaios foram realizados no laboratório de caracterização microestrutural LACAMI, da faculdade SATC.

3.8 ENSAIO DE DESGASTE

Para o ensaio de desgaste foi utilizado um tribômetro do tipo roda de borracha (areia seca), adotando-se o procedimento A, de acordo com o material

utilizado e seguindo os padrões da ASTM G65 - 00, a Fig. 10 ilustra o esquema do tribômetro utilizado.

Figura 10: Esquema Ensaio Roda de Borracha.



Fonte: Adaptado ASTM G65 (2000)

Foram fabricados corpos de prova com dimensões: comprimento de 2" largura de 1" e espessura de 1/2", antes de realizar o ensaio foi verificado a rugosidade superficial, para que a mesma estivesse abaixo do recomendado pela norma.

A areia utilizada como abrasivo no ensaio foi aquecida em forno a uma temperatura de 220°C durante 60 minutos para retirar toda a umidade presente, e sua granulometria foi reduzida a 0,35 mm com a utilização de peneiras.

A Tab. 3 a seguir, mostra os parâmetros utilizados nos testes.

Fluxo de areia (g/min)	Tempo de ensaio (min)	Abrasão linear (m)	Rotação (rpm)	Força normal (N)
300-400	30	4309	200	130

Fonte: adaptado ASTM G65 (2000).

Antes de iniciar o ensaio foi pesado o corpo de prova em uma balança de precisão em milésimos, e depois do ensaio, foi pesado novamente para se obter a perda de massa do corpo de prova. Para se obter a perda de volume foi utilizado a Eq. (5) segundo norma ASTM G65 - 00.

$$V = \frac{(M_i - M_f)}{\rho} * 1000 [mm^3] \quad (5)$$

Onde:

V = Volume [mm³]

M_i = Massa Inicial [g]

M_f = Massa Final [g]

P = Densidade [g/cm³]

Após ser calculado a perda de volume foi utilizado a equação de Archad adaptada Eq. (6), para se obter o coeficiente de desgaste K.

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

Onde:

K = Coeficiente de desgaste [mm²/N]

V = Volume [mm³]

N = Carga aplicada [N]

L = Distância percorrida [mm]

Os ensaios foram realizados no Laboratório Vibrações e Tribologia – LAVITRI do departamento da engenharia mecânica da Faculdade SATC.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DA AMOSTRA

Para realizar a caracterização do material utilizado atualmente foi realizada a composição química, mostrado como resultado a Tab. 4.

Tabela 4: Composição química da capa de dente usada atualmente em (%):

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

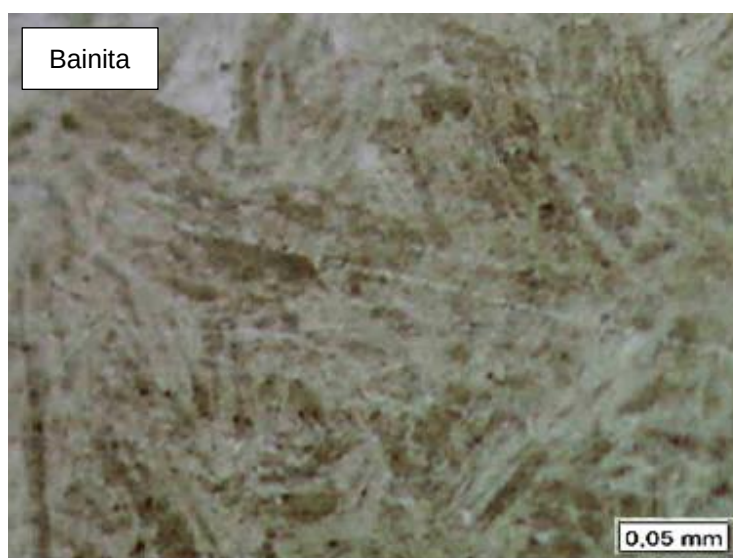
Fonte: do autor (2019).

Comparando a composição química obtida com a classificação dos aços o material que mais se assemelha foi o aço SC 4320.

Também foi realizado a medição de dureza em três pontos, obtendo uma média de 41 HRc. Posteriormente foi realizado o ensaio de desgaste em roda de borracha onde os resultados serão mostrados nos comparativos de desgaste.

A Fig. 11 mostra a metalografia realizada na amostra da capa de dente que é utilizada atualmente.

Figura 11: Microestrutura da capa de dente atual.



Fonte: do autor (2019).

4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA BLOCO PADRÃO

Após a realização da composição química do bloco padrão, obtiveram-se os resultados mostrados na Tab. 5.

Tabela 5: Composição química do bloco padrão em (%):

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,42	0,95	0,026	0,019	0,60	0,95	0,20

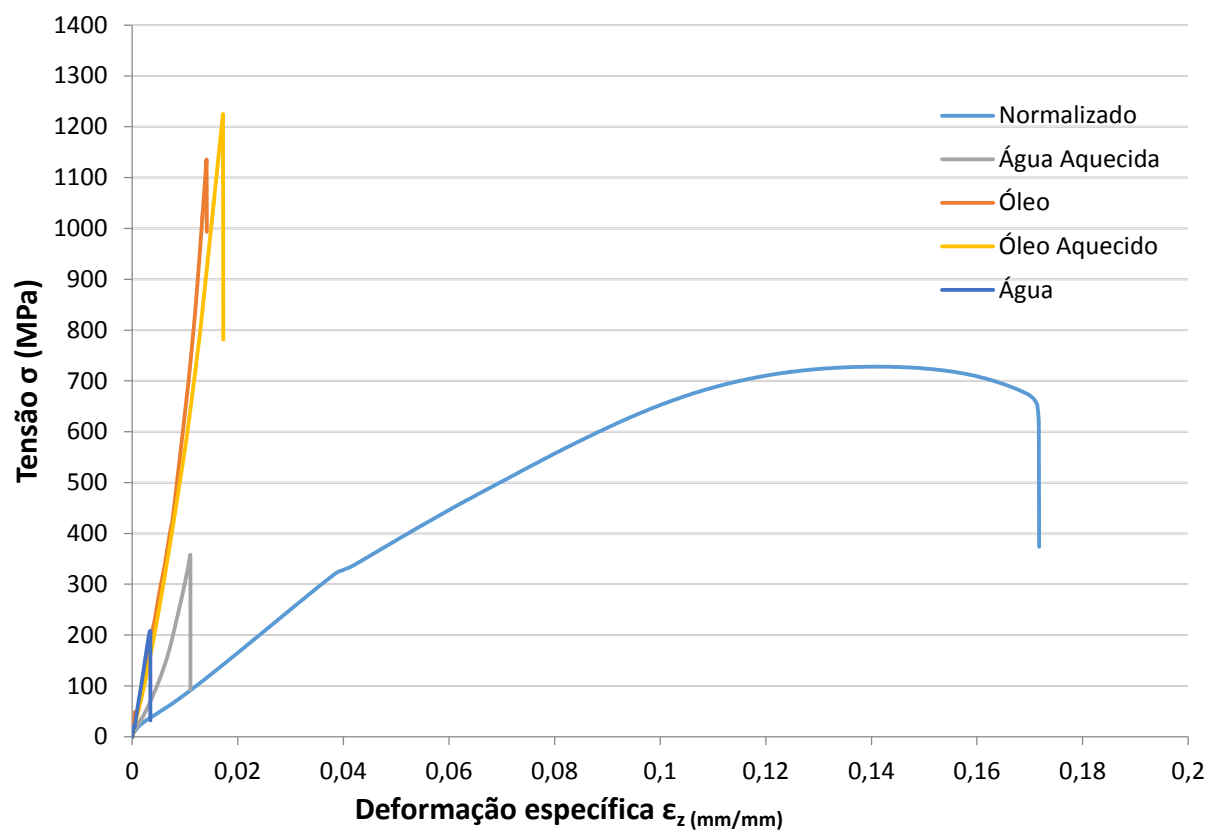
Fonte: do autor (2019).

Avaliando a composição química do material após ser fundido, verificou-se que a composição esta dentro do limite estabelecido pela norma A 958, podendo ser prosseguido os demais ensaios.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram realizados ensaios de tração no material normalizado e também em quatro tipos de resfriamentos de têmpera, água temperatura ambiente, água aquecida a 80°C, óleo temperatura ambiente e óleo aquecido a 80°C, onde os resultados podem ser observados na Fig. 12.

Figura 12: Gráfico - Tensão x Deformação após a têmpera.



Fonte: do autor (2019)

Observando os resultados, os resfriamentos realizados em água na temperatura ambiente e água aquecida, tornaram o material muito frágil, apresentando trincas em alguns corpos de prova, como mostra a Fig.13.

Os resultados obtidos no gráfico tensão *versus* deformação da Fig. 12, indica que os corpos de provas que foram resfriados em água podem ter sofrido influências de possíveis trincas internas.

Figura 13: Corpo de prova resfriado em água.

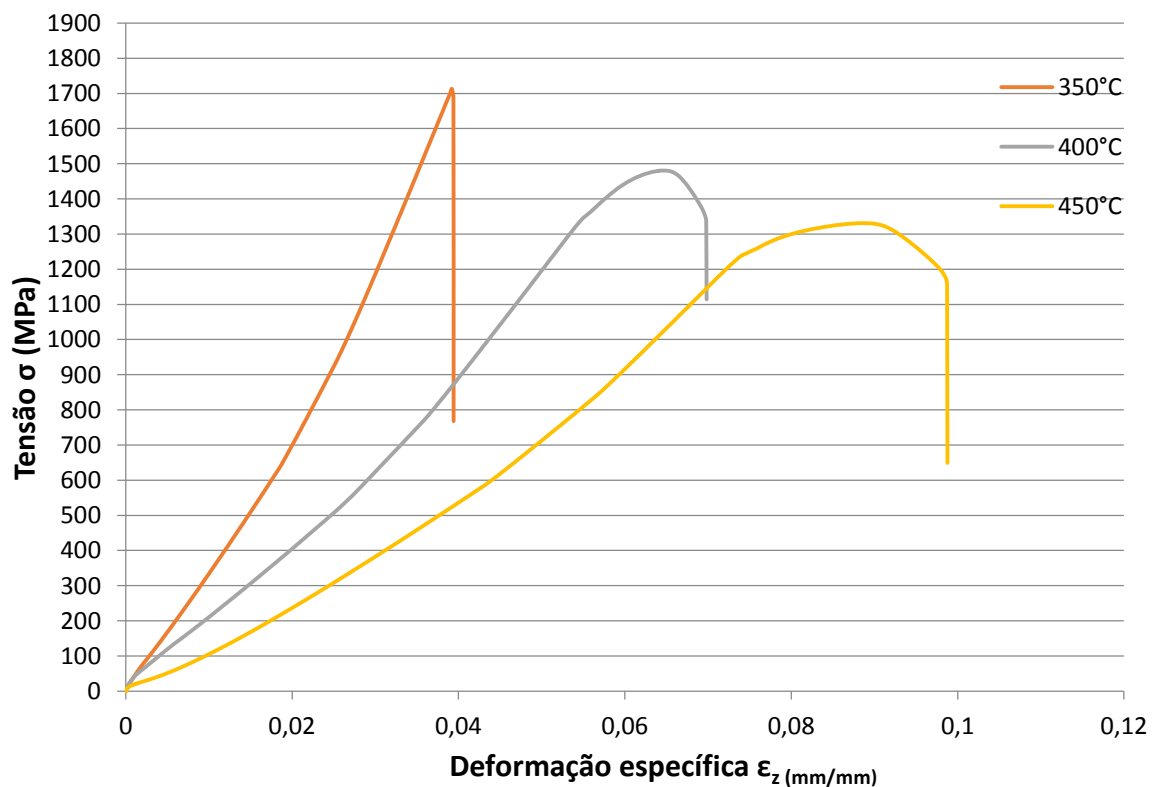


Fonte: do autor (2019)

O meio de resfriamento que obteve maior tensão e também uma maior deformação foi o resfriamento em óleo aquecido, sendo adotado como método de resfriamento para se prosseguir com o tratamento térmico de revenimento.

O revenimento foi realizado em três temperaturas 350, 400, 450°C, os resultados são mostrados na Fig. 14 a seguir. Após a realização dos ensaios foi obtida curva característica tensão *versus* deformação para cada temperatura de revenimento.

Figura 14: Gráfico - tensão deformação após revenimento.



Fonte: do autor (2019)

Pode-se observar através da Fig.14 as variações de tensão máxima e deformação para cada temperatura de revenido, onde quanto maior a temperatura de revenimento diminui sua tensão máxima, porem aumenta sua deformação.

Após a realização dos ensaios de tração foi calculado o módulo de resiliência utilizando a Eq. 3 também foi calculado o módulo de resiliência utilizando a Eq. 4. A Tab. 6 mostra os resultados obtidos através dos ensaios de tração.

Tabela 6: Resultados obtidos através o ensaio de tração.

Ensaio	Tensão Máxima σ Máx [MPa]	Tensão Escoamento σ_e [MPa]	ϵ [mm/mm]	ϵ_f [mm/mm]	U_r [Nmm/mm ³]	U_t [Nmm/mm ³]
Revenido 350°C	1700,89	1689,32	0,039	0,039	32,94	66,11
Revenido 400°C	1480,52	1400,77	0,060	0,080	42,02	115,25
Revenido 450°C	1329,01	1285,55	0,078	0,099	50,14	129,42

Fonte: do autor (2019)

Observando a Tab. 6 pode-se destacar um aumento de 42,45% no módulo de tenacidade entre o revenido a 350°C e o revenido a 400°C, devido à fragilidade do material revenido a 350°C. Já entre o revenido a 400°C e o revenido a 450°C obteve um aumento de 10,95%.

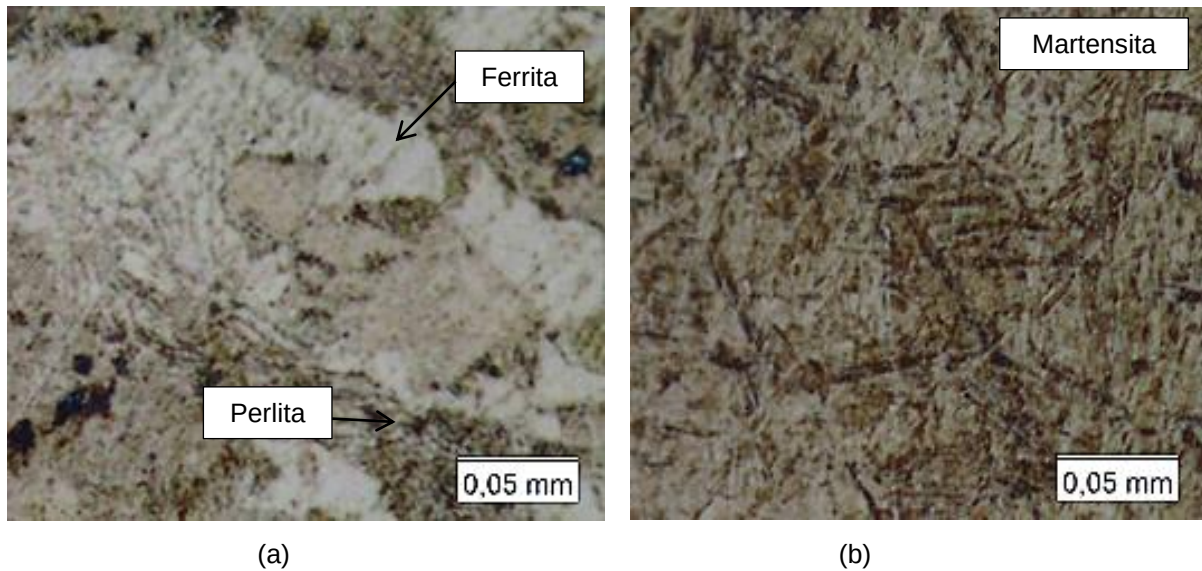
Segundo norma ASTM A 958 recomenda-se seguir os padrões da classe 90-60 para aplicações onde se necessita de boa resistência ao desgaste, peças para tratores, sapatas para movimentação de terra, penetradores de solo. Utilizando os parâmetros que a norma estabelece para esta classe e utilizando a equação do módulo de tenacidade Eq. (4) o módulo de tenacidade mínimo para esta aplicação é de 93,15 N*mm/mm³.

4.4 METALOGRAFIA

As amostras foram analisadas na forma normalizada e temperada em óleo aquecido, e após os revenimentos, a fim de se conhecer suas estruturas.

As Fig. 15 mostra a microestrutura do aço SC 4140 fundido (a) e normalizado (b) após o ataque nital e ampliado 500x.

Figura 15: a) SC 4140 normalizado; b) SC 4140 temperado em óleo aquecido. Ampliado 500X.

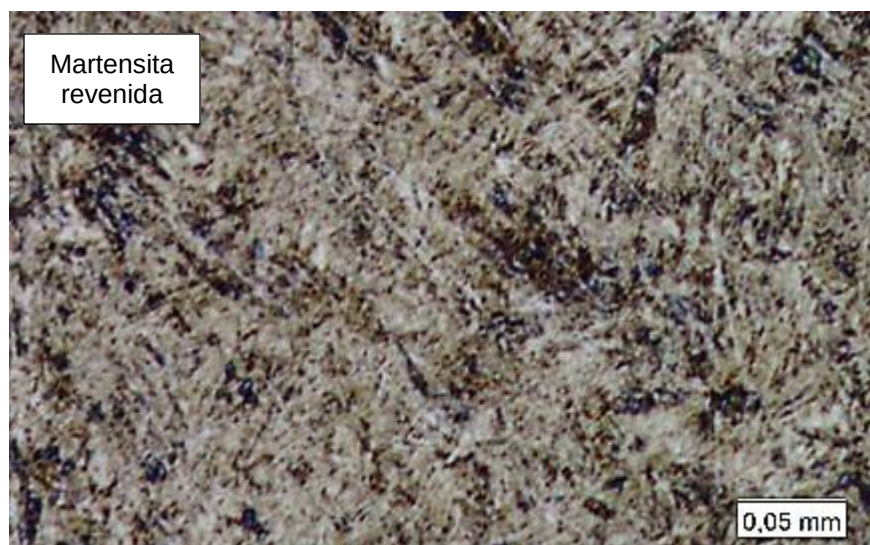


Fonte: do autor (2019)

A microestrutura após a normalização apresenta uma estrutura ferrita e perlita, após a têmpera em óleo aquecido, é possível identificar uma matriz de ripas alongadas que se referem à microestrutura martensítica que é típico de materiais com elevada dureza, porém muito frágeis.

A Fig. 16 mostra a microestrutura obtida após o revenimento em 350°C.

Figura 16: Microestrutura após revenimento 350°C. Ampliado 500X.



Fonte: do autor (2019)

Após o revenimento a 350°C a microestrutura apresentou martensita revenida, porém ainda com algumas formas de ripas acicular e com formas distorcidas. A Fig. 17 mostra a microestrutura obtida após ser realizado o revenimento em 400°C.

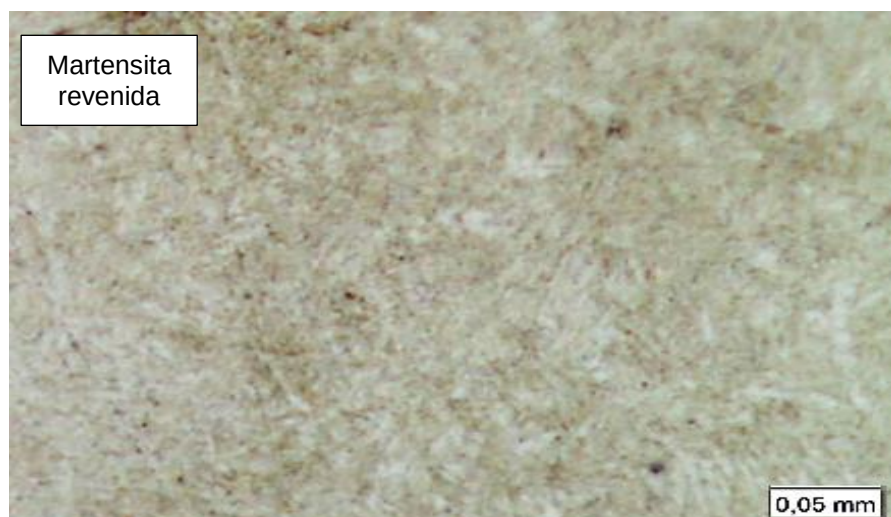
Figura 17: Microestrutura após revenimento 400°C. Ampliado 500X.



Fonte: do autor (2019)

Após o revenimento a 400°C, a amostra apresenta uma microestrutura de martensita revenida. Já a Fig.18 mostra a microestrutura obtida após ser realizado o revenimento em 450°C.

Figura 18: Microestrutura após revenimento 450°C. Ampliado 500X.



Fonte: do autor (2019)

Com a temperatura de 450°C de revenimento, apresentou uma estrutura composta de carbonetos (pontos esbranquiçados) na matriz de martensita revenida.

4.5 ENSAIO DE DUREZA

Os valores obtidos através do ensaio de dureza Rockwell C estão representados na Tab. 7, para cada tratamento térmico estudado foram realizadas medidas de dureza com média de três medidas.

Tabela 7: Valores obtidos através do ensaio de dureza em HRc.

ASTM SC 4140	Endentação			Média	Desvio padrão
	1°	2°	3°		
Normalizado	12	12	12	12	0,07
Temp. Óleo Aquecido	56	55	56	56	0,38
350°C	49	51	52	51	0,87
400°C	47	47	48	47	0,22
450°C	44	43	45	44	0,80

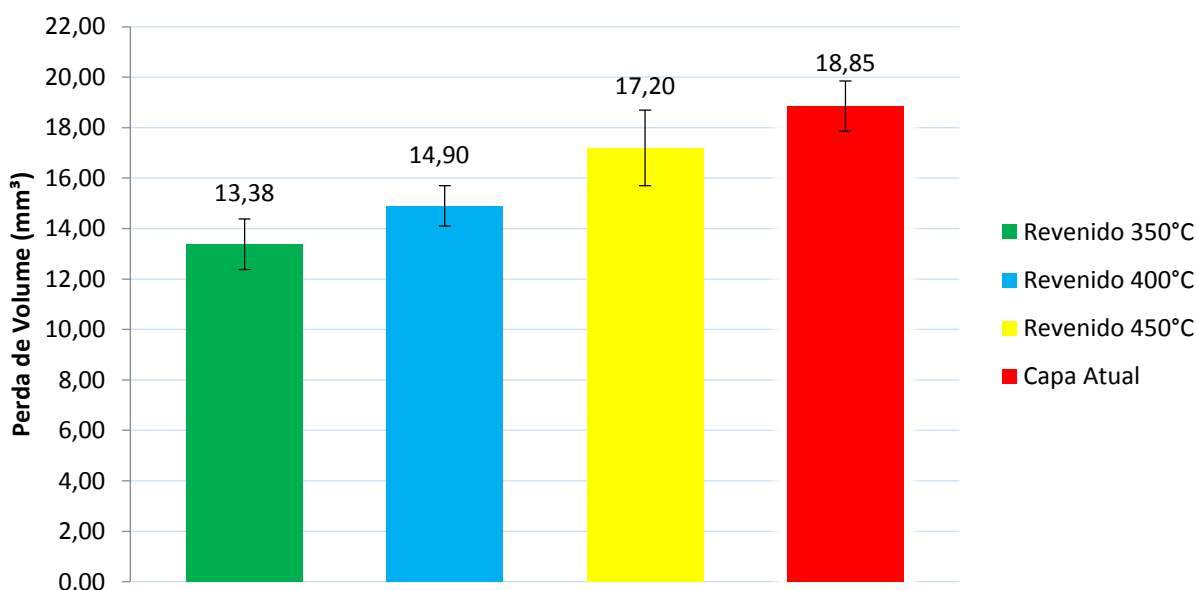
Fonte: do autor (2019)

Os valores obtidos de dureza sofrem uma queda contínua com o aumento da temperatura de revenido, devido uma transformação gradual da martensita em fases estáveis, ferrita e cementita, que influenciam diretamente nas propriedades mecânica do material.

4.6 COMPARATIVO DE DESGASTE ABRASIVO

A análise da resistência ao desgaste foi feita pela comparação com um material de referência, neste caso, foi utilizado o material que é utilizado hoje na fabricação das capas de dente. A Fig. 19 apresenta uma comparação da perda de volume no qual os valores são obtida através da média de cada ensaio.

Figura 19: Ensaio comparativo de desgaste abrasivo.



Fonte: do autor (2019)

O tratamento térmico de revenimento a 350°C foi o que teve a menor perda de volume entre todos os ensaios realizados, em comparação com a capa de dente que é utilizada atualmente obteve uma redução de 29% na perda de volume, já o revenimento a 400°C obteve uma redução de 21% também em relação à capa que é utilizada atualmente.

A seguir a Tab. 8 mostramos os coeficientes de desgaste, obtidos através da equação de Archad adaptada.

Tabela 8: Coeficiente de desgaste.

Coeficiente de Desgaste K [mm²/N]	
Revenido 350°C	$2,39 \times 10^{-8}$
Revenido 400°C	$2,66 \times 10^{-8}$
Revenido 450°C	$3,07 \times 10^{-8}$
Capa atual	$3,37 \times 10^{-8}$

Fonte: do autor (2019)

Analisando a Tab. 8, a capa que é utilizada atualmente pela empresa foi a que obteve o maior coeficiente de desgaste, já o revenido a 350°C obteve o menor coeficiente de desgaste entre os ensaios realizados, podendo assim, estar relacionado com a microestrutura martensítica do material, pois com o aumento da

temperatura desestabiliza a fase martensita com o início da precipitação do carbono e crescimento excessivo do grão.

5. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento desse estudo, pode-se chegar a seguintes conclusões:

- No tratamento térmico de têmpera o método de resfriamento em água para o material em estudo apresentou, em alguns casos, trincas após a têmpera devida sua alta fragilidade no resfriamento em água, já o resfriamento em óleo aquecido apresentou melhores propriedades dentre os meios de resfriamentos utilizados;
- O tratamento térmico de revenido aplicado no aço ASTM SC 4140 proporcionou de forma significativa mudanças na microestrutura do material. Também com uma pequena variação da temperatura de revenido a uma queda gradual na dureza da amostra, devido à transformação gradual da martensita;
- Nos ensaios de desgaste abrasivo se obteve uma variação de 21% na perda de volume entre a amostra revenida a 400°C e a capa de dente que é utilizada atualmente pela empresa, e ainda apresentando uma tenacidade superior a que a norma indica para esta finalidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão deste trabalho pode-se sugerir observações para trabalhos futuros:

- Estudo da fragilidade ao revenido em baixas temperaturas;
- Ensaio de impacto;
- Viabilidade econômica para aplicação deste material.

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo apoio que sempre recebi, a os professores Reginaldo Rosso Marcello e Fábio Peruch, por sua disposição e conhecimentos passados. Também agradeço a Emerson Gonçalves por fornecer os blocos fundidos.

6. BIBLIOGRAFIA

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 E7 92b: Standard Terminology Relating to Metallography. United States: ASTM, 2002.

ASTM G65, 2015. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Annual Book of ASTM Standards Volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259.

ALBERTIN, EDUARDO. Desgaste abrasivo. Rio de Janeiro. Julho. 2003. 61 slides. Apresentação em Power-point.

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, www.spectru.com.br

CALLISTER, Willian D., 2007. **Ciências e Engenharia de Materiais** – Uma introdução. 7^a ed. Rio de Janeiro. Editora LTC.

CASTRO, Felipe Ribeiro, 2013. Avaliação do comportamento mecânico e tenacidade a fratura do aço sae/aisi 4140 submetido a tratamento térmico criogênico. Dissertação de mestrado Univercidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, RJ.

CHIAVERINI, Vicente,. 2005 “**Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmico**”, 7ª ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. P. 87 – 95.

CHIAVERINI, Vicente, 1986, Tecnologia mecânica – **Processos de fabricação e tratamentos**. Volume II. 2ª ed. São Paulo, McGraw-Hill.

CHIOSSI, N.J. Geologia Aplicada à Engenharia, 2013. Deus, Gustavo Portela, 2008, **Análise e avaliação dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários após revestimento**. Dissertação Mestrado - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 115p.

COSTA e Silva, Andre Luiz & Mei, Paulo Roberto, **Aços e ligas especiais**, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

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

Hawk, J. A., Wilson,R. D., Tylczak J. H., Dogan, O. N., **Laboratory abrasive wear tests: Investigation of test methods and alloy correlation**, wear abrasive, Nº 225-229, 1999, pp. 1031-1042

KRELLING, A. Tratamentos Térmicos e Termoquímicos, Disponível em: <http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/T%C3%A9cnico%20em%20Mec%C3%A2nica%20Integrado/TTT/2%20%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos%20e%20Termoqu%C3%ADmicos.pdf>. Acessado em 14 de outubro de 2019.

METALS HANDBOOK. Casting, 9th ed. American Society form Metals International, 1988, p.647-685. V.15.

PANNONI, Fabio Domingos. Aços Estruturais. 2005.

TASSI, R. Revestimentos superficiais via PAPVD e avaliação do desempenho de bicos pulverizadores de suspensões cerâmicas. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2010.

Souza, Gisélia Alves de. Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica. Guaratinguetá, 2008.

UNICATRATOES. **Dentes para concha de escavadeiras**. Disponível em: <https://www.unicatratores.com.br/dentes-concha-escavadeira>. Acesso em 07 de abril de 2019.

VALE. **Qual a importância da mineração para a economia do país?** Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/qual-a-importancia-da-mineracao-para-a-economia-do-pais.aspx>. Acesso em 18 de outubro de 2019.

LISTA DE SÍMBOLOS

Ur	[N.mm/mm ³]	Módulo de Resiliência
σ_e	[MPa]	Limite de Escoamento
ϵ	[mm/mm]	Deformação Elástica
Ut	[N.mm/mm ³]	Módulo de Tenacidade
σ_r	[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