

ANÁLISE DE DESGASTE ABRASIVO DO AÇO SAE 5120 CEMENTADO E REVENIDO EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Thiago ZILI VIVAN¹; Paulo ROBERTO MACHADO NUNES²; Elvys ISAIAS MERCADO CURI³; Richard MEDEIROS CASTRO⁴;

¹SATC, thiago_zilivivan@hotmail.com; ²SATC, paulonunesmachado@hotmail.com; ³SATC, elvys.curi@satc.edu.br; ⁴SATC, richard.castro@satc.edu.br.

RESUMO

O aço SAE 5120 é amplamente utilizado nas indústrias mineradoras e de pavimentação. A principal característica deste material é sua grande resistência à fratura e de suportar as condições de desgaste severo, após passar por processo de cementação. Sua utilização em peças forjadas abrange uma ampla gama, como por exemplo, em correntes de arrasto de carvão, as utilizadas em mineradores contínuos, na qual é necessária boa ductibilidade e de resistência ao desgaste. A caracterização ao desgaste abrasivo dos materiais, normalmente se realiza com auxílio de tribômetros, convencionalmente utilizam-se os de roda de borracha com areia seca, conforme a norma ASTM G65. Neste trabalho, a resistência ao desgaste abrasivo deste material é avaliada experimentalmente em diferentes condições de tratamento térmico, além de testes de microdureza e caracterização microestrutural. Para realizar os ensaios, foram preparados os corpos de prova forjados do aço SAE 5120, posteriormente usinados para atender as dimensões padronizadas do ensaio. Foram separados os corpos de provas em grupos de três peças para cada condição de tratamento. O primeiro grupo contou com materiais no estado fornecido, o segundo grupo foi tratado superficialmente por cementação sólida realizada a 950°C e o terceiro e quarto grupo passaram por posterior revenimento após a cementação e têmpera. Realizaram-se as medidas de durezas nos corpos de prova já identificados, constatando-se como esperado uma maior dureza nos corpos que foram apenas cementados e temperados, em relação aos corpos que sofreram revenimento. Após os ensaios no tribômetro foram comparadas as taxas de desgaste, calculando a perda volumétrica de cada grupo de material. Ao final, constatou-se uma taxa de desgaste 0,42 % do material em estado fornecido, 0,22 % do cementado e temperado e 0,16 % a 350 °C e 0,31 % a 400 °C, no material cementado e revenido.

Palavras-chave: aço SAE 5120, forjamento, desgaste, cementação, revenimento.

ABSTRACT

The steel SAE 5120 is widely used in the mining and road construction industries. The main characteristic of this material is its great resistance to fracture and to withstand the conditions of severe wear, after going through the process of cementation. Its use in forged parts covers a wide range, as for example in coal trawls, those used in continuous miners, in which good ductility and wear resistance is required. The characterization of the abrasive wear of the materials is usually carried out using tribometers. Test of rubber wheel with dry sand is conventionally used according to ASTM G65. In this work the resistance to abrasive wear of this material is evaluated experimentally in different heat treatment conditions, besides microhardness and microstructural characterization tests. In order to perform the tests, the forged specimens of SAE 5120 steel were prepared, later machined to meet the standardized dimensions of the test. The test specimens were separated into groups of three pieces for each treatment condition. The specimens were separated into groups of three pieces for each treatment condition. The first group consisted of materials in the supplied state, the second group was surface treated by solid carburizing performed at 950 °C and the third and fourth groups were submitted subsequent tempering after carburizing and quenching. Hardness measurements were performed on the specimens already identified, confirming that a greater hardness was expected in the specimens that were submitted carburizing and quenching, in relation to the bodies that passed through the tempering. After the tests in the tribometer the wear rates were compared, calculating the mass loss of each group of material. At the end, it was found a wear rate of 0.42 % of the material in the supplied state, 0.22 % of cemented and tempered, and 0.16 % at 350 °C and 0.31 % at 400 °C in the cemented material and tempered.

Key-Words: SAE 5120 steel, forging, wear, cementation, tempering.

1 INTRODUÇÃO

Devido às altas exigências no mercado por reduzir os tempos produção e frequências de intervenções em máquinas, há uma grande preocupação no desenvolvimento de materiais que resistam às condições extremamente severas geradas por influências do meio mineral. Pesquisas de equipamentos e materiais que se adaptam a essas condições, e que apresentem resistência mecânica adequada, ganha espaço no cotidiano industrial.

Devido ao desenvolvimento avançado das indústrias carboníferas do extremo sul catarinense, torna-se necessário a busca de uma maior velocidade de extração de minérios, substituindo antigos métodos de extração, como a detonação por dinamite, por métodos de extração mecanizada, onde neste caso utilizam-se mineradores contínuos, *shuttle car* e alimentadores de correia, ganhando espaço no cenário nacional.

O minerador contínuo divide-se em partes de extração, movimentação e processamento de minérios, seus componentes principais são: cabeça de corte, recolhedor, sistema de transporte (corrente de transporte). Um dos maiores problemas encontrados atualmente em alguns equipamentos, são as paradas geradas por manutenções não planejadas, devido a falhas oriundas do grande esforço gerado pelo processo de extração.

Dentre os componentes que apresentam maiores problemas de desgaste e substituição neste processo, são os elos utilizados na corrente de arrasto do minerador. Estes, normalmente são materiais fabricados por forjamento, que em seguida passam por processos de tratamento térmico, com intuito de melhorar algumas propriedades mecânicas e aumento da resistência ao desgaste.

Um exemplo de material utilizado é o aço SAE 5120 forjado, cementado e beneficiado, onde seu emprego nas indústrias de mineração e pavimentação tem espaço para testes e análises. Este material é composto por elementos de liga, como cromo e manganês (GGD®, 2016). No caso de aços ligados com adição de manganês entre 0,70 a 1,00%, proporcionam melhor usinabilidade, carbonetação e a menor tendência à formação de pontos de menores durezas (Chiaverini, 1986).

Segundo Mantel (1986), a cementação garante a aços de baixo carbono, uma superfície com dureza elevada devido à difusão do carbono, e um núcleo dúctil garantindo uma maior resistência ao impacto.

Após a cementação, para que o material obtenha a dureza pretendida, é necessário que se realize ainda uma têmpera, o qual consiste no aquecimento do material até uma temperatura ligeiramente superior a linha de transformação da austenita, seguido de um rápido resfriamento, geralmente em água ou óleo (Rudney and Totten, 2014). O objetivo deste processo é obter uma estrutura refinada onde se obtém uma significativa melhora na resistência ao desgaste, unindo a um aumento da tenacidade sendo uma das mais adequadas a martensítica revenida. Após o processo de tempera, é realizado o revenimento para fazer o alívio de tensões geradas durante a formação da martensita, devido ao rompimento dos planos cristalográficos, ocorridos pelo resfriamento rápido (Fadare *et al*, 2011).

Segundo pesquisas realizadas por Kirchner (2014), corpos de prova de dentes de pinhões fabricados em aço SAE 5120, observa-se o aumento da tenacidade pelo princípio do processo de cementação e com menor dureza no núcleo do corpo de prova devido à difusão do carbono, aumentam em 10% sua resistência à ruptura por torção. Ao respeito da dureza do núcleo e a fadiga, Sandor (2010), experimentalmente observa que a variação do número de ciclos nos ensaios de fadiga tem correlação com a dureza do núcleo.

Pesquisas realizadas por Mallik *et al*, (2015), descrevem a utilização de tratamentos térmicos realizadas em diversas condições, para o revestimento Co-Cr-Mo depositado por solda. Neste estudo os autores descrevem como resultados de 8 condições de testes, expressivas acréscimos nos valores de dureza e na resistência ao desgaste dos corpos de prova de Co-Cr-Mo. No teste de nº 7, ou seja, na condição de temperatura a 1200 °C, durante 60 minutos e temperado, sem envelhecimento, o corpo de prova apresentou uma maior resistência ao desgaste e um salto na dureza 316 ± 3 HV (sem tratamento), para 371,6 ± 2 HV.

Para determinar a taxa de desgaste e comparar os materiais e seus processos de beneficiamento, assim como, a análise de revestimentos utilizados em superfícies de componentes mecânicos, comumente realiza-se o ensaio de desgaste abrasivo do tipo de roda de borracha e areia seca, conforme a norma ASTM (ASTM, G65). Para a realização deste ensaio, são determinados pela norma alguns parâmetros, de acordo os materiais e revestimentos que estarão submetidos ao teste.

Por fim, este trabalho teve como objetivo avaliar a taxa de desgaste dos materiais submetidos a diferentes tratamentos térmicos e temperaturas, com intuito de fornecer maiores subsídios na escolha correta dos materiais para a aplicação em correntes de transporte utilizadas na indústria da mineração.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes foi realizada a fabricação dos corpos de prova pelo processo de usinagem e posteriormente retificação, mantendo-se constantemente a refrigeração dos mesmos, feita através de um fluido de corte, com intuito de não interferir nos resultados da microestrutural dos materiais. Todos os corpos de prova foram fabricados a partir de peças já forjadas e o material no estado normalizado. Após estes procedimentos os corpos foram divididos em 4 grupos que passaram por processos distintos de tratamento.

2.1 CEMENTAÇÃO TEMPERA E REVENIMENTO

Os tratamentos foram realizados em um forno de resistência elétrica com capacidade de temperatura de até 950 °C, onde as amostras passaram pelo processo de aquecimento a temperatura de 870 °C, utilizando assim os procedimentos convencionais de 1 hora de forno por cada polegada de espessura das amostras para total homogeneização da temperatura do corpo de prova, sendo assim todas permaneceram 30 min em forno. Para a carbonetização superficial, as amostras foram expostas ao meio carbonizante como especificado pelo fabricante, durante um tempo de 1 minuto, resfriada em água. Este processo se repetiu somente uma vez para todos os corpos de prova.

A Figura 1 representa o forno utilizado no tratamento térmico e o material de carbonetização superficial, denominado de Cimentox®.

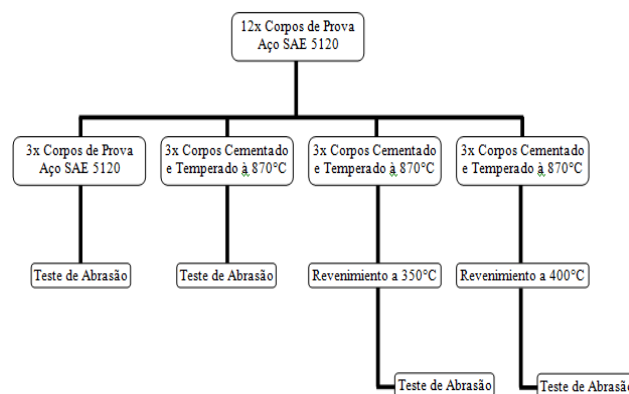
Figura 1. Forno de tratamento térmico e material para cementação.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 2 representa o fluxograma dos ensaios realizado nos corpos de prova bem como a divisão dos grupos.

Figura 2. Fluxograma dos ensaios realizados



Fonte: Autor (2016).

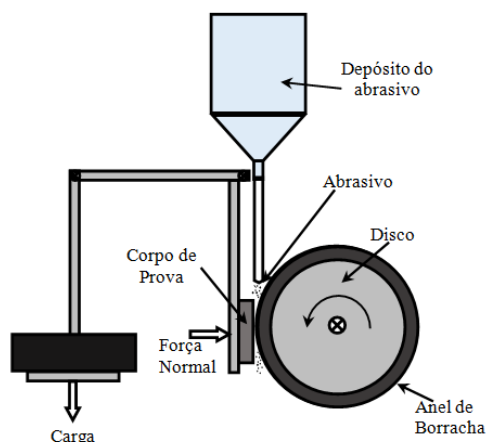
Todos os materiais tiveram as mesmas dimensões, sendo analisadas as suas rugosidades antes de cada ensaio. Os corpos de prova que foram analisados por micrografia foram preparados com uma amostra adicional que foi seccionada e realizada a análise de micrografia. Também foram medidas as durezas dos corpos de prova na escala de dureza Vickers.

2.2 ENSAIO DE DESGASTE

Para o ensaio de desgaste utilizou-se um Tribômetro do tipo roda de borracha, adotando-se o procedimento A, de acordo com o material utilizado. Neste procedimento, cada corpo de prova é pressionado contra uma roda de borracha que apresenta uma dureza de 58 a 60 Shore. A roda de borracha desloca-se com uma rotação de 200 rpm com uma faixa de variação de ± 10 rpm. Para o abrasivo deve-se utilizar areia sílica com classificação de AFS 50/55 e teor de umidade não superando 0,5% do peso. A carga aplicada no braço de alavanca varia conforme as classes utilizadas.

Para o procedimento dos ensaios de desgaste foram utilizados equipamentos do Laboratório de Vibrações e Tribologia – LAVITRI, do departamento da engenharia mecânica da Faculdade SATC, onde foram disponibilizadas as areias adquiridas de uma fundição da região. Inicialmente houve a secagem da areia colocando em um recipiente amplo e introduzindo em um forno a uma temperatura de 150°C, ficando 20 minutos para secar a areia depois se introduz a um recipiente para que retorne à temperatura média ambiente de 25°C. Na Figura 3 é representado o princípio do ensaio de desgaste.

Figura 3. Esquemático de funcionamento do Tribômetro.



Fonte: Autor (2016).

A areia foi colocada na máquina de ensaio regulando seu fluxo e controlando a velocidade de giro da roda de borracha. Os parâmetros utilizados para os testes estão presentes na Tabela 1 que apresenta o procedimento A, segundo a norma ASTM G-65.

Tabela 1 - Valores utilizados para os parâmetros dos ensaios

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

A composição do corpo de prova é analisada por ensaios de espectrometria e sua granulometria a través da micrografia de todos os corpos de prova.

Antes de iniciar o ensaio se pesa o corpo de prova em uma balança de precisão que mede em miligramas o corpo de prova, depois do ensaio se volta a pesar de modo que se consegue medir a perda de massa que ocorreu durante o ensaio para todos os corpos de prova.

Para determinar a taxa de desgaste Q (mm^3/m) gerados no processo utilizou-se da Equação (1) segundo a norma regente.

$$Q = \frac{\left(\frac{M_i - M_f}{\rho}\right) \cdot 1000}{4309} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Após de realizar o ensaio de desgaste, se realiza um cálculo da média da taxa de desgaste e seu desvio padrão dos ensaios, sendo fácil de identificar a diferença de desgaste para as mesmas condições de ensaios nos corpos de prova.

Os resultados são mostrados em tabelas, figuras e gráficos que comparam o desempenho de

cada corpo de prova em relação ao tipo de tratamento.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das análises do material medidas de dureza, micrografia, medidas da perda de massa e cálculo da taxa de desgaste dos corpos de prova (CP) são apresentados e explicados a seguir.

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

Para que fosse comprovada a composição química do material utilizado, realizou-se o teste de espectrometria com o auxílio do Espectro Lab. Jr CCD. Os resultados são indicados na Tabela (2)

Tabela 02 – Composição química dos materiais

Material	C (%)	Cr (%)	Mn (%)	Si (%)	Fe (%)
SAE 5120	0,12-0,22	1,00-1,30	1,00-1,40	0,15-0,35	Demais
Corpo de prova	0,20	1,07	1,1	0,21	Demais

A comparação dos resultados da composição química da amostra com a norma SAE para aços 51XX- classificados como aço cromo, mostram que o material teve todas as suas composições dentro das delimitações de cada faixa de elementos, certificando que os corpos de provas, ou seja, o material utilizado na pesquisa é realmente um aço SAE 5120.

3.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MEDIÇÃO DE MICRODUREZA VICKERS

Para a caracterização microestrutural das amostras ensaiadas foram utilizados os processos convencionais da metalografia como, corte da seção transversal dos corpos de prova e o polimento da superfície a ser analisada. Também foram obtidos perfis de microdureza Vickers HV0.01/20, através de um microdurômetro modelo HMV-02 TADW - SHIMADZU, e as imagens foram capturadas com ampliação de 1000 x, empregando-se um microscópio do tipo ótico, modelo BX 51M - OLYMPUS.

As indentações foram realizadas a cada 1 mm de espessura em direção ao centro do corpo de prova. Na Figura 4 são apresentados os resultados das medições de microdureza. As médias das durezas são mostradas na Tabela 3. O desvio padrão (SD) obtido das 5 medições para cada grupo dos corpos de prova se relacionam com o tipo de tratamento.

Figura 4. Perfil de microdureza x distância da superfície.

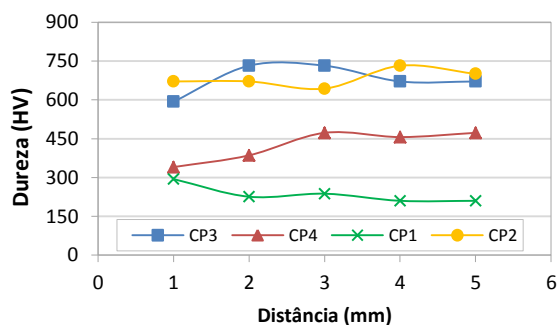


Tabela 3 - Valores médios das durezas para cada grupo.

Grupo	Média da dureza (HV)	Desvio padrão (HV)	Tipos de tratamento térmico
1	235,56	34	Normalizado
2	683,68	57	Cementado e temperado
3	679,89	33	Cementado, temperado e revenido a 350 °C
4	425,55	59	Cementado, temperado e revenido a 400 °C

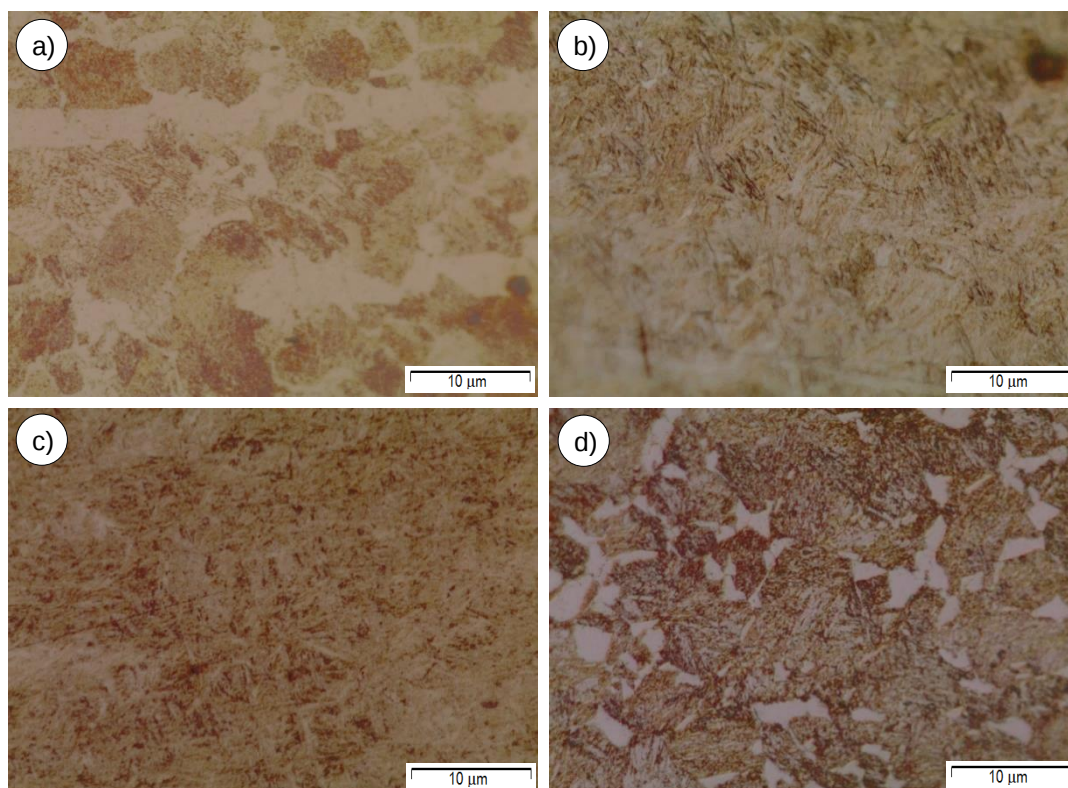
O grupo de materiais que apresentou maior dureza foi submetido ao processo de cementação junto a posterior têmpera que apresentou uma dureza

média de 683 HV com um desvio padrão referente às três amostras de 57 HV.

As imagens representadas pela Figura 5 são as micrografias de cada grupo. Os corpos de prova foram submetidos ao processo de lixamento e polimento, seguidas do ataque com nital 2%. As imagens revelam a formação de estruturas distintas, em que os corpos de prova que sofreram o processo de revenimento, obtiveram uma estrutura mais uniforme em comparação as demais.

O grupo 2 apresentou a formação e a predominância da estrutura martensítica, devido à transformação e ao resfriamento gerado pela elevada troca térmica do resfriamento, como se pode verificar na Figura (5b). Para os demais processos os materiais submetidos à posterior revenimento foram obtidos estruturas mescladas de martensita revenida com alguma bainita. Os grupos 2 e 3 apresentaram grande semelhança entre suas estruturas cristalinas tendo predominância de uma estrutura martensítica .

Figura 5. Micrografia dos materiais. a) grupo 1, b) grupo 2, c) grupo 3 e d) grupo 4.



De acordo com as micrografias pode-se verificar a mudança da microestrutura do material de acordo com os processos sofridos. Através da Figura 5 (a), percebe-se o formato alongado das

regiões de ferrita, representando a transformação obtida pelo processo de forjamento. Nos corpos de prova do grupo 2 (Figura 5(b)) e do grupo 3 (Figura 5(c)) ocorreu mudança de sua estrutura perceptível

pelo refinamento dos grãos, apresentando uma semelhança o que se comprova com a medição de dureza e também nos testes de desgaste abrasivo. A estrutura da Figura 5 (d) representa o material depois de passar pelo processo de revenimento, apresentando-se com uma estrutura mais grosseira em comparação as do grupo 2 e 3.

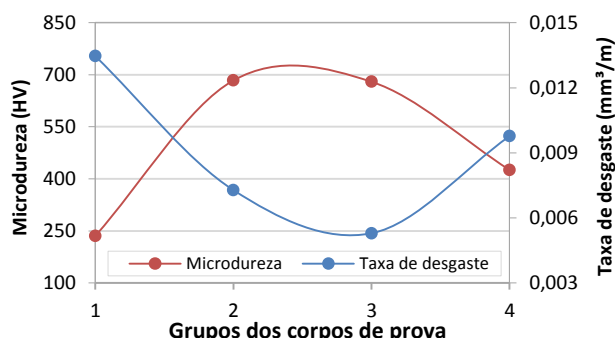
3.3 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO

Os resultados obtidos por meio do ensaio de desgaste foram calculados utilizando a Eq. 1, assim podemos encontrar a taxa de desgaste volumétrica linear do material. A Tabela 4 mostra os valores calculados das perdas de volume e seu correspondente desvio padrão.

Tabela 4 – Resultados do desgaste de cada grupo

Grupo de CP	Varição de massa (g)	Desvio padrão (g)	Taxa de desgaste (mm ³ /m)
1	0,453	0,04	13,46079 x 10 ⁻³
2	0,245	0,02	7,28012 x 10 ⁻³
3	0,178	0,02	5,28923 x 10 ⁻³
4	0,329	0,03	9,77616 x 10 ⁻³

A Figura 6 representa a relação entre os grupos, suas durezas e suas taxas de desgaste.



O grupo das amostras que apresentaram maior taxa de desgaste linear encontra-se dentro do grupo 1, sendo este o material com menor dureza correspondente. Para os demais grupos que passaram pelo processo de cementação, têmpera e revenimento apresentaram desgaste relativamente reduzidos, o processo de revenimento apresentou dentro do grupo 4, uma redução significativa da dureza, aumentando também a sua taxa de desgaste. O grupo 3 foram as amostras que apresentaram menor taxa de desgaste passando pelo processo de revenimento a 350 °C, o revenimento dentro deste grupo representou um queda mínima na dureza em relação ao processo do grupo 4, mais representou no processo de desgaste

um redução em comparação ao grupo somente temperado. Conforme o comportamento da curva, o desgaste dentro dos grupos 2 e 3 tiveram uma redução considerável, mais não reduzindo sua dureza com a mesma relação, isso se deve a fragilidade do material onde passado pelo processo de tempera somente, formasse uma estrutura frágil e não regular, assim com o revenimento temos uma redução das tensões internas e assim uma taxa de desgaste reduzida.

4.0 CONCLUSÕES

Com base nos resultados conclui-se que:

- O material mais indicado e tratamentos para o processo abrasivo pertenceu ao grupo 3.
- Durante a análise microestrutural identificou-se a modificação da estrutura do material, demonstrando que o aço SAE 5120, mesmo não apresentando considerável percentual de carbono em sua estrutura, sofreu a formação de martensita, isso se deve a porcentagem de manganês e cromo identificados na composição.
- Na cementação não houve uma penetração perceptível, isso se deve ao controle do tempo durante o tratamento que não se mostrou suficiente para ser identificada a camada cementada, o que denota a fragilidade do processo de cementação sólida.
- O revenimento realizado a 400 °C teve uma redução de dureza consideravelmente alta em comparação ao revenimento realizado a 350 °C.
- O material SAE 5120 apresentou sua menor taxa de desgaste abrasivo com o tratamento de cementação e beneficiamento com durezas médias de aproximadamente 679 HV.

5.0 AGRADECIMENTOS

Agradecemos a estrutura e ao apoio dado pela metalúrgica e ao grupo de extração mineral Rio Deserto, com comprometimento e a melhora contínua dos processos.

6.0 REFERÊNCIAS

American Society for Testing & Materials. **ASTM G-65-04**, "Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus". 2010.

Chiaverini, V., **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2º Ed. São Paulo: Makron books do Brasil, 1986. pp.138-139.

E.R. Mantel; M.M. Shea, **Hardening Response of Carbonitrided Rimmed and Aluminum-Killed SAE 1010 Steels**, Journal of Heat Treating, Vol. 4 (No. 3), 1986, pp 237-246.

Fadare, D. A., Fadara, T. G., Akanbi, O. Y. **Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel**. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 10, Nº.3, pp. 299-308, 2011.

GGD Metais, 2016. Aços - Construção Mecânica. <http://www.ggdmetals.com.br/wpcontent/uploads/2015/07/CatConstrucao.pdf?x72549>. Acesso em Maio de 2016.

Kirchner I. Marcelo. **Otimização de Material e de tratamento térmico no desenvolvimento de um componente automotivo**, Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2014.

Mallik, M.K.; Rao, C.S.; Rao, V.V.S.K. **Effect of Heat Treatment on Hardness and Wear Behavior of Weld Deposited Co-Cr-Mo Alloy**. Revista Matéria, v. 20, n. 2, pp. 544 – 549, 2015.

Rudney, V., Totten, G. E. **ASM Handbook: Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment**. Estados Unidos: ASM International, 2014. 820 p.

Sandor, L., Politori, i., Gonçalves, C., Ueahara, A., Leal, C., Sato, M., Ferreira, I. **Fatigue crack propagation in Nine Steel , Type SAE 43XX, from 0.2 to 1.00 % C, for the simulation of fatigue behaviour in a carburized layer of SAE4320**. Procedia Engineering, Vol. 2, pp. 735-742, 2010.