

INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NAS PROPRIEDADES DE LIGAS USADAS EM EQUIPAMENTOS DE BRITAGEM E MOAGEM DE MINÉRIOS

Influence of the microstructure on the properties of alloys used in ore crushing and grinding equipments

Alessandro Fraga Farah [I]
Wellington Lima Martins [II]
Solange Pereira dos Santos Farah [III]
Márcia Aparecida Gomes [IV]
Edson Luís Boldrin [V]

RESUMO

O desenvolvimento de novas ligas na indústria de mineração visa aumentar a vida útil do equipamento, mudando suas propriedades mecânicas, importantes no seu desempenho. Para contribuir com esse avanço, esse trabalho consistiu em analisar os dados obtidos após ensaios mecânicos realizados em ligas desenvolvidas e aplicadas em britadores e moinho de bolas. Para esse desenvolvimento, quatro ligas de aço de diferentes composições foram fundidas. As ligas tiveram a variação de carbono e cromo com a finalidade de investigar a influência desses elementos na microestrutura e nas propriedades desses materiais. Após a fundição, as amostras foram tratadas termicamente para chegar nas características de desempenho em campo. Foram feitos ensaios de dureza, desgaste e metalografia. Após a realização dos ensaios, os resultados obtidos foram comparados com as características microestruturais obtidas. Os resultados mostraram a importância da adição de cromo e carbono nas ligas sujeitas a desgaste abrasivo.

Palavras-chave: ligas metálicas; mineração, britadores; moinhos; desgaste.

ABSTRACT

The development of new alloys in the mining industry aims to increase the lifespan of equipment by modifying its mechanical properties, which are crucial to its performance. To contribute to this advancement, this work consisted of analyzing the data obtained after mechanical tests performed on alloys developed and applied in crushers and ball mills. For this development, four steel alloys with different compositions were cast. The alloys varied in carbon and chromium content to investigate the influence of these elements on the microstructure and properties of these materials. After casting, the samples were heat-treated to achieve field performance characteristics. Hardness, wear, and metallographic tests were performed. After the tests, the results were compared with the obtained microstructural characteristics. The results demonstrated the importance of adding chromium and carbon to alloys subject to abrasive wear.

[I] Professor Dr., Fatec Sertãozinho, alessandro.farah@fatec.sp.gov.br
[II] Tecnólogo, Fatec Sertãozinho, falandocomwellington@outlook.com
[III] Professora Ms., Fatec Sertãozinho, solange.farah@fatec.sp.gov.br
[IV] Auxiliar Docente Ms., Fatec Sertãozinho, marcia.gomes@fatec.sp.gov.br
[V] Auxiliar Docente Tecnólogo, Fatec Sertãozinho, edson.boldrin@fatec.sp.gov.br



Keywords: metal alloys; mining; crushers; mills; wear.

Data de submissão do artigo: 15/07/2025.
Data de aprovação do artigo: 16/09/2025.
DOI: https://doi.org/10.33635/sitefa.v8i1.343

1 INTRODUÇÃO

Os minérios em geral, são materiais altamente abrasivos e, durante o seu processo de beneficiamento, ocasiona, nos equipamentos das instalações de tratamento, desgastes relevantes em suas estruturas (Oliveira, 2020). E segundo Lencina *et al.* (2015) e Holmberg *et al.* (2017), o desgaste abrasivo, caracterizado pelo destacamento do material das superfícies causado pelo movimento relativo e pela impulsão de partículas duras entre superfícies opostas ou fixadas em uma delas, é o mais importante tipo de desgaste, devido ao seu caráter destrutivo e ao seu elevado índice de frequência, sendo a maior parte das falhas por desgaste.

Os custos do desgaste estão diretamente ligados ao reparo ou substituição de peças desgastadas e perdas de produção devido ao tempo de inatividade do equipamento relacionado, segundo Oliveira (2020).

Para diminuir o desgaste, esses equipamentos e componentes são revestidos por placas de desgaste, que são fabricadas e projetadas para proteger e evitar maiores danos ao equipamento (Mascia, 2002). De acordo com Oliveira (2015) e Ribeiro (2020), a seleção e aplicação dos componentes contra desgaste mais apropriados, podem ter uma influência muito significativa na produtividade, devido à diminuição de tempo de parada e manutenção.

A melhor relação entre composição química, tratamento térmico e resistência ao desgaste e ao impacto requer muito estudo e testes em campo. Entre os materiais utilizados nas operações de beneficiamento e extração de minérios, segundo Carmo (2017) e Pereira *et al.* (2020), os principais são os aços altamente ligados ao manganês, os ferros fundidos branco de alto cromo, aços baixa liga temperados e revenidos, aços bainíticos e, também, ferro fundido nodular austemperado. A adição de elementos formadores de carbonetos, pode alterar as propriedades tribológicas do material influenciando na sua resistência ao desgaste, segundo Filipovic *et al.* (2013).

A necessidade de realizar manutenção e troca de componentes em equipamentos, é sempre necessário, e quando se constata que há uma falha no maquinário, precisa encontrar formas de torná-lo mais eficiente, como substituindo peças que se desgastaram durante o trabalho do equipamento por outras com melhores propriedades mecânicas, pois a aquisição de um novo sempre que há uma falha gera um aumento de custo para a empresa. Assim sendo, o desenvolvimento de novas ligas metálicas é de grande importância para o uso cotidiano das empresas. Esse trabalho focou em examinar ligas metálicas utilizadas em peças e componentes de equipamentos de moagem e britagem de minérios. Ligas de aços ligados ao cromo (Cr) e molibdênio (Mo), com algumas variações do percentual de carbono (C), foram obtidas através do processo de fundição e posteriormente tratados termicamente, por têmpera e revenimento. Foram analisadas as durezas, a resistência ao desgaste abrasivo e a microestrutura das ligas. Para tanto foram feitos os ensaios de dureza Rockwell, desgaste por Roda de borracha e as análises metalográficas das amostras. Os resultados obtidos foram comparados entre si, com o intuito de destacar as características predominantes em cada liga, e seu melhor desempenho.



2 REVISÃO BILIOGRÁFICA

Atualmente, uma parte significativa das despesas operacionais de empresas de mineração e processamento corresponde ao custo de substituição e reparo de elementos desgastados de equipamentos de mineração. Nesse sentido, a tarefa de aumentar a resistência ao desgaste desses elementos é bastante relevante, conforme evidenciado por um número significativo de estudos sobre o assunto.

De acordo com Dukhnenko (2019), a extração e o processamento de recursos naturais são impossíveis sem equipamentos altamente eficientes com desempenho aprimorado. A taxa de extração de recursos naturais é limitada por uma série de fatores associados às condições geológicas, de mineração, de desempenho dos equipamentos e que podem influenciar significativamente a economia da mineração.

Segundo Bolobov *et al.* (2021), durante a mineração e o processamento de rochas, os elementos do equipamento que estão em contato direto com a rocha são os mais expostos ao desgaste. São eles: dentes de caçambas de escavadeiras, esteiras de equipamentos rodoviários, impactores, martelos, revestimentos, placas defletoras de britadores e moinhos, silos de recebimento e suportes de tubos de passagens de minério.

Segundo Ribeiro (2020), durante o processamento mineral, diversos equipamentos como transportadores, peneiras, britadores, alimentadores, moinhos, dentre outros, sofrem com constantes impactos e atritos que, consequentemente, leva ao desgaste. A maioria dos equipamentos de britagem e moagem empregados na indústria de processamento de minerais são condicionados pelo seu desempenho de desgaste (Holmberg *et al.* 2017).

Segundo Brykov *et al.* (2024), o desgaste de peças de máquinas é um dos principais fatores que limitam a vida útil dos equipamentos de mineração. As superfícies em contato direto com a rocha ou solo estão sujeitas ao desgaste abrasivo, que é o mais agressivo entre todos os modos de desgaste. As perdas globais totais de energia por desgaste abrasivo são iguais às perdas de todos os outros tipos de desgaste. Segundo Lencina *et al.* (2015), a taxa de desgaste abrasivo excede a taxa de outros tipos de desgaste em várias ordens de magnitude.

Os mecanismos de desgaste são categorizados em desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste por fadiga, desgaste corrosivo e outros, que agem de maneira individual ou em conjunto, dependendo do tribossistema que se encontra, e são classificados com base nas características de danos à superfície dos materiais sujeitos aos fenômenos (Holmberg *et al.* 2017; Ribeiro, 2020). Segundo Máscia (2002), o mecanismo de desgaste é influenciado por vários fatores, incluindo as propriedades do material, condição da superfície, lubrificação, carga de contato e até mesmo temperatura ambiental e condições operacionais.

Entre os materiais utilizados nas operações de beneficiamento e extração de minérios, os principais são os aços altamente ligados ao manganês, ferro fundido alto cromo, aços baixa liga temperados e revenidos e, também, ferro fundido nodular austemperado (ADI), conforme relatam Biermann *et al.* (2013), Oliveira (2015), Carmo (2017) e Pereira *et al.* (2020). Os aços martensíticos ou bainíticos são novas alternativas de materiais para esta aplicação devido a suas altas durezas e melhores propriedades mecânicas, como a tenacidade, de acordo com Biermann *et al.* (2013) e Machado e Sinátora (2015).

A mesma tecnologia de processamento de materiais pode ter efeitos diferentes na resistência ao desgaste de um determinado material, dependendo de suas condições de desgaste (Bolobov *et al.,* 2021).

VIII SITEFA
Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho

Para a melhoria das propriedades que auxiliam nestas aplicações, a condição temperado e revenido tem aumentado a vida útil desses materiais, de acordo com os trabalhos de Filipovic *et al.* (2013), Hassan e Jawad (2015), Al-Rubaie, Preti e Pohl (2016) e Allende-Seco *et al.* (2021),

Além do tratamento térmico, a mudança na composição química tem produzidos efeitos benéficos nas aplicações de resistência ao desgaste. Segundo Al-Rubaie e Pohl (2014), Carmo (2017),e Pereira *et al.* (2020), elementos formadores de carbonetos como Cr, Mo, Nb, Ti e V, têm sido adicionados para melhorar o comportamento tribológico. A adição desses elementos, pode alterar as propriedades tribológicas do material principalmente devido à formação de carbonetos, de acordo com Brykov *et al.* (2024). Ou seja, a adição de elementos como Cr, Mo, Nb, etc., segundo Filipovic *et al.* (2013), Hassan e Jawad (2015) e Al-Rubaie, Preti e Pohl (2016), influencia tanto na natureza quanto na fração volumétrica de carbonetos formados durante o processo de solidificação.

Os estudos de Biermann *et al.* (2013), Hassan e Jawad (2015), Carmo (2017) e Ribeiro (2020), além do teor de carbono, o cromo influencia propriedades como a tenacidade e resistência à abrasão, principalmente devido à fixação do carbono na forma de carbonetos duros, tanto na forma primária quanto na formação do eutético. A quantidade dos elementos aliadas à combinação com o carbono, facilita a precipitação de carbonetos que são muito importantes para as características mecânicas das ligas, de acordo com Filipovic *et al.* (2013), Al-Rubaie, Preti e Pohl (2016) e Pereira *et al.* (2020).

3 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados nesse trabalho foram desenvolvidos especialmente para esse estudo e são demonstrados a seguir.

3.1 Ligas desenvolvidas

Para a realização desse estudo foram fundidas quatro ligas no formato das peças utilizadas nos moinhos e britadores. As ligas foram fundidas na empresa Fundição Eduardo – SA, localizada em Santa Cruz de la Sierra, Bolívia. A Figura 1 mostra a peça fundida para as análises.

Figura 1 - Peça fundida após retirada dos canais e massalotes



Fonte: autores do trabalho (2025)

As composições químicas das ligas fundidas estão na Tabela 1.



Tabela 1 - Composição química em peso (%) das ligas

	Elemento (%)											
Liga	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Fe
XF210	0,90	0,64	0,80	0,02	0,01	12,33	0,20	0,22	0,02	0,12	0,09	Bal.
XF252	1,51	0,52	0,73	0,02	0,01	12,03	0,16	0,20	0,02	0,11	0,10	Bal.
XF314	0,47	0,68	0,87	0,02	0,02	7,03	0,48	0,16	0,02	0,13	0,10	Bal.
XF270	0,48	1,25	0,75	0,01	0,01	5,10	0,34	0,18	0,06	0,06	0,09	Bal.

Fonte: autores do trabalho (2025)

As ligas XF210 e XF252 foram fundidas variando o percentual de carbono (C) e mantendo o percentual de cromo (Cr) e molibdênio (Mo).

As ligas XF314 e XF270 foram fundidas variando o percentual de cromo (Cr) e mantendo o percentual de carbono (C) e molibdênio (Mo).

Após fundidas, as ligas foram temperadas e revenidas para apresentarem durezas bem próximas, pois o intuito era comparar a microestrutura com a variação dos elementos Cr e C.

3.1.1 Preparo das amostras das ligas para os ensaios de desgaste e dureza

As amostras foram usinadas e cortadas em três corpos de provas para cada liga, e dimensionadas no padrão do equipamento de abrasão com impacto (25x150x12,5mm). Esse ensaio não possui norma, sendo apenas comparativo. Depois desse ensaio, as amostras foram redimensionadas para o ensaio de desgaste de roda de borracha, segundo a norma ASTM G65.

Cada amostra foi pesada no início e depois de cada ensaio, para determinação da perda de massa. Tanto no equipamento de abrasão com impacto quanto no de roda de borracha, o tempo foi de 30 minutos. No ensaio de roda de borracha esse tempo é direto e no de abrasão com impacto, é de 10 em 10 minutos, com troca de abrasivos a cada tempo.

O ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha, consistiu em colocar o corpo de prova na fixação inerente do dispositivo, e depois inserir os contrapesos que mantém o corpo de prova em constante contato com a roda de borracha, após a fixação iniciou-se a rotação da roda e o caimento da areia abrasiva, que cai paralelamente entre a roda e o corpo de prova.

No ensaio de abrasão com impacto, as amostras são submetidas a passarem dentro de um recipiente com abrasivos (córindon), que gira em sentido contrário às amostras.

Para a realização dos ensaios de dureza, utilizou-se um durômetro analógico tipo Rockwell, na escala C, conforme norma ASTM E18. Foram feitas cinco medições em cada amostra, a fim de estabelecer uma dureza média de cada liga.

3.1.2 Preparo das amostras das ligas para os ensaios de metalografia

Após a realização dos ensaios de desgaste, iniciou-se o processo de preparação dos corpos de prova para o ensaio de metalografia, conforme norma ASTM E3. A amostra foi cortada na secção transversal dos corpos de prova. Logo após realizou o embutimento em baquelite, em seguida o polimento e por fim, foi feito o ataque químico com Nital 2% e Marble, permitindo uma caracterização das microestruturas encontradas.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho serão apresentados e discutidos a seguir.

4.1 Resultados dos Ensaios de Dureza

A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de dureza das ligas estudadas.

Tabela 2 - Durezas das ligas estudadas

Amostras	Dureza (HRc)	Desvio Padrão (HRc)
XF210	52,5	0,4
XF252	54,0	0,8
XF314	51,8	0,5
XF270	52,0	0,4

Fonte: autores (2025)

Os resultados obtidos na tabela são uma média de cinco medições por amostra.

Nota-se que os resultados ficaram bem próximos, pois as amostras foram tratadas por têmpera e revenidas para que tivessem as durezas próximas.

4.2 Resultados dos Ensaios de Desgastes

A Tabela 3 ilustra as perdas resultantes dos ensaios de desgastes. Os ensaios foram realizados em todas as ligas estudadas. Os seguintes resultados são uma média de 03 ensaios para cada amostra.

Tabela 3 - Perdas de massa dos ensaios de desgaste

Ensaio de Abrasão	**Com Impacto**		**Roda de Borracha**	
Amostras	Perda de Massa (mg)	Desvio Padrão (mg)	Perda de Massa (mg)	Desvio Padrão (mg)
XF210	708,0	25,5	78,7	1,7
XF252	659,3	37,1	52,3	3,2
XF314	630,3	53,2	142,0	3,7
XF270	684,0	17,0	130,3	1,8

Fonte: autores (2025)

Analisando os dados encontrados nos ensaios de desgaste é possível determinar que o procedimento de abrasão com impacto possui uma maior perda de massa que o ensaio de roda de borracha. O que já era esperado.

Entretanto, nota-se que a diferença entre as ligas no ensaio de abrasão com impacto não foi tão significativa, onde a diferença da menor perda (XF314 = 630,3) e da maior perda (XF210 = 708,0) foi de apenas 11%. Essa diferença fica dentro da margem do desvio padrão.

Mas analisando os resultados do ensaio de roda de borracha, essa diferença entre as ligas chegou a 275% (XF252 = 52,3 e XF314 = 142,0).

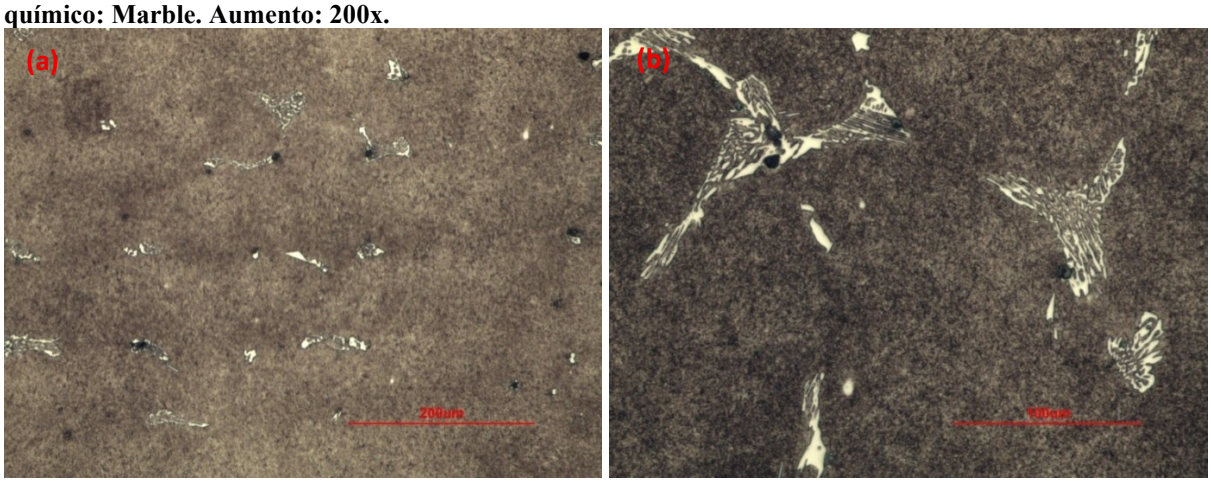
Para um melhor entendimento das variações dos resultados tivemos que analisar as microestruturas.

VIII SITEFA
Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho

4.3 Ensaios Metalográficos

As micrografias na Figura 2 (a) e (b), mostram as microestruturas da amostra XF210.

Figura 2 - Microestruturas da Amostra XF210. (a) Ataque químico: Marble. Aumento: 100x. (b) Ataque químico: Marble. Aumento: 200x.

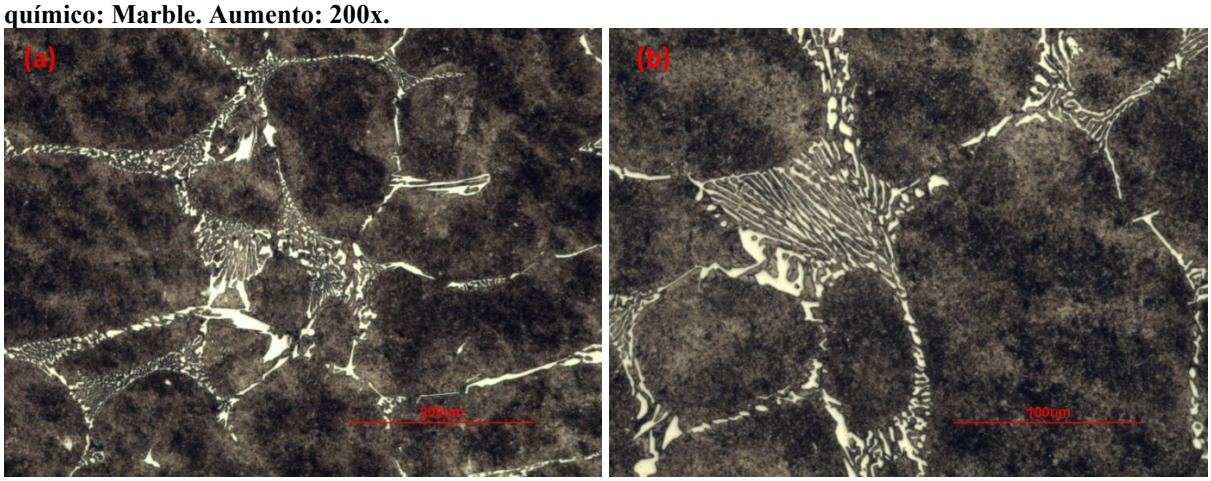


Fonte: autores (2025)

A microestrutura analisada é composta de martensita revenida e carbonetos eutéticos de cromo (fases claras entre os grãos). Nota-se também uma estrutura levemente dendrítica, típica de material fundido. Os pontos pretos são poros.

As micrografias na Figura 3 (a) e (b), mostram as microestruturas da amostra XF252.

Figura 3 - Microestruturas da Amostra XF252. (a) Ataque químico: Marble. Aumento: 100x. (b) Ataque químico: Marble. Aumento: 200x.

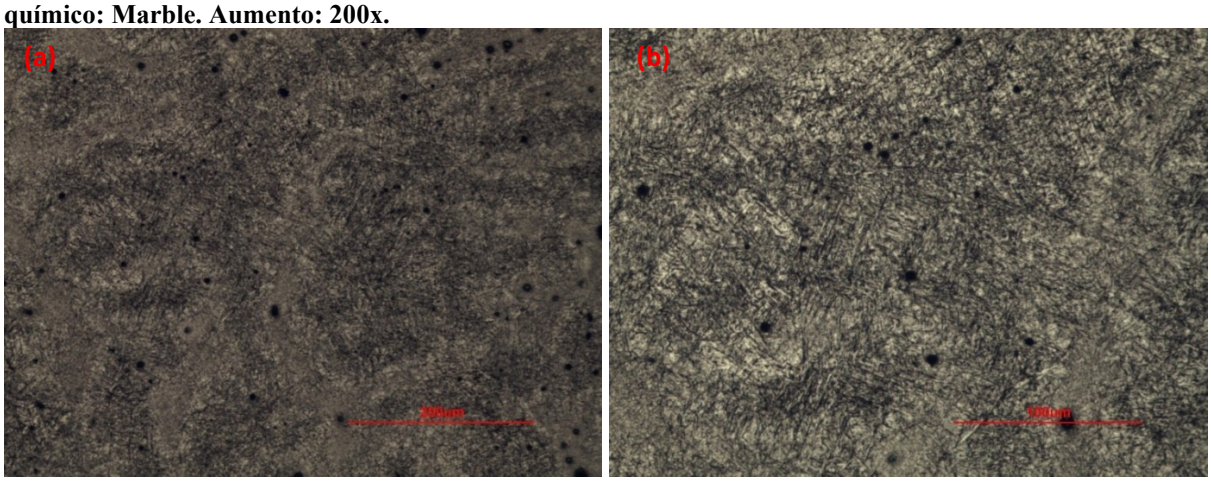


Fonte: autores (2025)

A microestrutura analisada é composta de martensita revenida e carbonetos de cromo (eutéticos e primários). Nota-se também uma estrutura dendrítica (matriz e carbonetos), típica de material fundido. Devido ao maior teor de carbono, mais carbonetos foram formados. Os pontos pretos são poros.

As micrografias na Figura 4 (a) e (b), mostram as microestruturas da amostra XF314.

Figura 4 - Microestruturas da Amostra XF314. (a) Ataque químico: Marble. Aumento: 100x. (b) Ataque químico: Marble. Aumento: 200x.

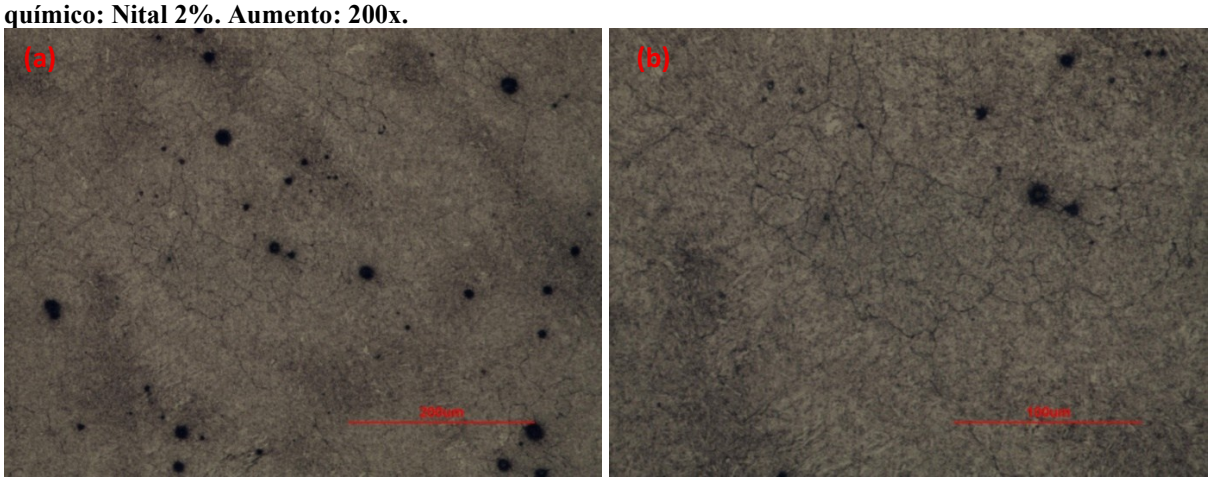


Fonte: autores (2025)

A microestrutura analisada é composta de martensita revenida. É possível observar a presença de austenita retida (fases claras). Nota-se também uma estrutura dendrítica, típica de material fundido. Os pontos pretos são poros.

As micrografias na Foto 4 (a) e (b), mostram a microestrutura da amostra XF270.

Foto 4 - Microestruturas da Amostra XF270. (a) Ataque químico: Nital 2%. Aumento: 100x. (b) Ataque químico: Nital 2%. Aumento: 200x.



Fonte: autores (2025)

A microestrutura analisada é composta de martensita revenida. Nota-se também uma estrutura levemente dendrítica, típica de material fundido, com grãos heterogêneos (pequenos e grandes). A quantidade de austenita retida é muito pequena. Os pontos pretos são poros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A perda de massa nos ensaios de abrasão com impacto foi proporcional à dureza de cada material, ou seja, como as durezas tiveram pequena variação, o desgaste também variou muito pouco.



A perda de massa nos ensaios de abrasão com roda de borracha variou, independente da proximidade de dureza das ligas analisadas, sendo necessário a avaliação das microestruturas.

As microestruturas das ligas XF210 e XF252 apresentaram carbonetos de cromo, o que refletiu na melhoria de desgaste em relação às ligas XF314 e XF270.

Quando se compara as ligas XF210 e XF252, nota-se um melhor desempenho no desgaste da liga XF252, o que pode ser explicado pela maior quantidade de carbonetos. A liga XF252 teve o carbono aumentado em relação à liga XF210.

Os resultados mostraram que para uma melhor resistência ao desgaste abrasivo, o aumento de carbono e cromo é necessário.

REFERÊNCIAS

ALLENDE-SECO, R.; ARTIGAS, A.; BRUNA, H.; CARVAJAL, L.; MONSALVE, A.; SKLATE-BOJA, M. F. Hardening by Transformation and Cold working in a Hadfield Steel cone Crusher Liner. **Metals**, v. 11, n. 6, p.961, jun.2021.

AL-RUBAIE, K. S.; POHL, M., Heat treatment and two-body abrasion of Ni-Hard 4. **Wear**. 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.01.013. Acesso em: 23 de maio de 2025.

AL-RUBAIE, K. S.; PRETI, O.; POHL, M. On the abrasion of heat-treated 2.8C21Cr1Mo white cast iron. **International Journal of Materials Research** (formerly Zeitschrift fuer Metallkunde). IJMR_MK111408 – 23.6.16/reemers. July 2016. DOI: 10.3139/146.111408.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E3 – 11. **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**, ASTM International, West Conshohocken, EUA, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E18 – 15. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. 2015. ASTM International. West Conshohocken, EUA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM G65 – 16, **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus,** ASTM International, West Conshohocken, EUA, 2016.

BIERMANN, D., HARTMANN, H., TERWEY, I., MERKEL, C., KEHL, D. Turning of high-strength bainitic and quenched and tempered steels. **Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems** 2013. Procedia CIRP 7 (2013) 276 – 281. doi: 10.1016/j.procir.2013.05.047.

BOLOBOV, V. I.; CHUPIN, S. A.; AKHMEROV, E. V.; PLASCHINSKIY, V. A. Comparative Wear Resistance of Existing and Prospective Materials of Fast-Wearing Elements of Mining Equipment. **Materials Science Forum**. Submitted: 2021-03-05 ISSN:



1662-9752, v. 1040, p. 117-123 Accepted: 2021-04-20
doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.

BRYKOV, M.; SHALOMEEV, V.; MATVEEV, V.; PARAHNEVICH, E.; TABUNSHCHYK, G.; RUBAN, V. Composition and treatment of wear resistant steel for application in mining industry. **V International Conference "Essays of Mining Science and Practice IOP.** Conf. Series: Earth and Environmental Science 1348 (2024) 012075 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1348/1/012075 1.

CARMO, Dircilene. **Obtenção de aços fundidos de elevada resistência mecânica, boa tenacidade e resistência ao desgaste**. Dissertação (Mestrado). PPG em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2017.

DUKHNENKO, Y. Study Of Materials Test Methods For Wear Resistance In Oil And Mining Industry. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology** (IJMET) Volume 10, Issue 03, March 2019, pp. 1781–1791, Article ID: IJMET_10_04_180. ISSN Print: 0976-6340 and ISSN Online: 0976-6359.

FILIPOVIC, M.; KAMBEROVIC, Z.; KORAC, M.; GAVRILOVSKI, M. Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-C-Nb white cast irons. **Materials & Design**, v. 4. p. 41-48, 2013.

HASSAN, A.; JAWAD, Q. A. Experimental Study of the Effect of Austenitizing Temperature and Multiple Tempering on the Microstructure of AISI 410 Martensitic Stainless Steel. **The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering**, v.1, n. 18, May 2015.

HOLMBERG, K.; KIVIKYTÖ-REPONEN, P.; HÄRKISAARI, P.; VALTONEN, K.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. **Tribology International**. Volume 115, November 2017. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.010.

LENCINA, R.; CALETTI, C.; BRUNELLI, K.; MICONE, R.. Assessing wear performance of two high-carbon Hadfield steels through field tests in the mining industry. **Procedia Materials Science**. Scientific Committee of SAM–CONAMET 2014. doi: 10.1016/j.mspro.2015.05.005., Elsevier. 2015.

MACHADO, P.C., SINATORA, A. Resistência a abrasão do aço manganês austenítico na indústria de mineração. **Anais**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 18 a 22 de maio de 2015, Salvador, Bahia, Brasil. 2015.

MÁSCIA, Roberto. **Desenvolvimento e caracterização tribológica de materiais resistentes ao desgaste abrasivo para a indústria mineradora de cassiterita**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, PPG em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2002.



OLIVEIRA, Cláudio Gonçalves de. **Desenvolvimento e caracterização de liga de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio para uso em mineração**. Dissertação (Mestrado). PPG em Engenharia de Materiais; Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, 2015.

OLIVEIRA, Cláudio Gonçalves. **Adição de elementos de liga (Boro e Nióbio) em Ferro Fundido Branco Alto Cromo: uma análise comparativa do ganho de resistência ao desgaste abrasivo versus custo**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2020.

PEREIRA, N. F. S.; CANGUSSU, V. M.; SOUZA, P. S.; REIS, B. C. M.; SANTOS, A. J.; CARMO, D. J.; RUBIO, J. C. C. Análise do comportamento do par tribológico aço fundido alto C e alto Si contra o metal duro sem e com revestimento de TiN. **Journal of Experimental and Techniques Instrumentation - JETI**, v.4, n.1, 2020 - DOI: 10.30609/JETI-2020-11787.

RIBEIRO, Marcos Paulo. **Avaliação das propriedades mecânicas e resistência ao desgaste abrasivo de aço fundido de baixo carbono ligado ao Ni-Cr-Mo com adição de nióbio**. Dissertação (Mestrado). PPG em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020.