



Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho - Deputado Waldir Alceu Trigo

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”
FACULDADE DE TECNOLOGIA (FATEC) DE SERTÃOZINHO – SP
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECÂNICA: PROCESSOS DE
SOLDAGEM.**

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LIGAS FUNDIDAS PARA
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO**

MARCELO DA SILVA

PROF. ORIENTADOR: PROF. DR. ALESSANDRO FRAGA FARAH

**SERTÃOZINHO, SP
2025**

MARCELO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LIGAS FUNDIDAS PARA
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO**

Monografia Técnico-Científico apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) à Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah

**SERTÃOZINHO, SP
2025**

MARCELO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LIGAS FUNDIDAS PARA
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO**

Monografia Técnico-Científico apresentada como Trabalho de
Conclusão de Curso (TCC) à Faculdade de Tecnologia de
Sertãozinho, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah

Data da aprovação: ____/____/____.

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah
FATEC de Sertãozinho – SP – Brasil

Prof.
FATEC de Sertãozinho – SP – Brasil

Prof.
FATEC de Sertãozinho – SP – Brasil

Local: Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho
Sertãozinho – SP – Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos aos nossos familiares, pelo apoio, paciência e incentivo constante, fundamentais para que esta conquista se tornasse possível. Agradecemos também a todo o corpo docente da FATEC Sertãozinho, que com dedicação, comprometimento e excelência no ensino, contribuiu de forma significativa para nossa formação acadêmica e para a elaboração deste trabalho. A Deus, nossa gratidão pela força e sabedoria concedidas nos momentos mais desafiadores, pois sem Sua presença e direção não teríamos alcançado esta importante etapa de nossas vidas. Este trabalho é o resultado da fé, da perseverança e do esforço coletivo em busca da realização de nossos objetivos pessoais e profissionais.

RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados pela indústria de mineração é o desgaste prematuro de equipamentos e componentes, o que acarreta aumento de custos operacionais devido às paradas para substituição, manutenção ou reparo das peças. Este trabalho tem como proposta avaliar as propriedades tribológicas de ligas metálicas desenvolvidas por fundição, destinadas à aplicação em componentes utilizados nesse setor. As ligas em estudo apresentam variações nos teores de carbono, cromo e molibdênio. Após a fundição e os tratamentos térmicos, essas ligas exibem diferenças significativas em dureza, resistência ao impacto e resistência ao desgaste, em função de suas distintas características microestruturais. O principal objetivo deste estudo foi comparar a resistência ao desgaste e ao impacto entre as ligas desenvolvidas, bem como correlacionar suas propriedades mecânicas de dureza e impacto, com o tipo de desgaste observado. Foram realizados ensaios de análise microestrutural, dureza, desgaste e impacto. Os resultados obtidos mostraram que os materiais com maior teor de carbono e elementos de liga (Cr e Mo), tiveram melhor desempenho em desgaste moderado, mas piores resultados em resistência ao impacto. As ligas com menores teores de carbono e elementos de liga (Cr e Mo) foram melhores no impacto e tiveram resistência ao desgaste satisfatórias. Todos os resultados foram comparados entre as ligas fundidas e tratadas termicamente. Espera-se que os resultados contribuam para futuros estudos e para o aprimoramento das aplicações industriais no setor de mineração.

Palavras-chave: desgaste; tratamento térmico; mineração; tribologia.

ABSTRACT

One of the main challenges faced by the mining industry is the premature wear of equipment and components, which leads to increased operating costs due to downtime for replacement, maintenance, or repair of parts. This work aims to evaluate the tribological properties of metallic alloys developed by casting, intended for application in components used in this sector. The alloys under study present variations in carbon, chromium, and molybdenum content. After casting and heat treatments, these alloys exhibit significant differences in hardness, impact resistance, and wear resistance, due to their distinct microstructural characteristics. The main objective of this study was to compare the wear and impact resistance between the developed alloys, as well as to correlate their mechanical properties of hardness and impact with the type of wear observed. Microstructural analysis, hardness, wear, and impact tests were performed. The results showed that materials with higher carbon and alloying element (Cr and Mo) content performed better in moderate wear, but had worse results in impact resistance. Alloys with lower carbon and alloying element (Cr and Mo) content performed better in impact and had satisfactory wear resistance. All results were compared between cast and heat-treated alloys. It is expected that these results will contribute to future studies and the improvement of industrial applications in the mining sector.

Keywords: wear; heat treatment; mining; tribology.

SUMÁRIO

1 - Introdução.....	09
2 - Revisão bibliográfica.....	10
2.1 Desempenho dos componentes na indústria mineral.....	10
2.2 Mecanismos de desgaste.....	10
2.3 Influência da seleção de materiais na produtividade.....	11
2.4 Materiais aplicados em operações de mineração.....	11
2.5 Influência do tratamento térmico e da composição química.....	11
2.6 Efeito dos elementos de liga formadores de carbonetos.....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1 Materiais utilizados.....	13
3.2 Tratamentos térmico.....	13
3.3 Ensaios mecânicos e tribológicos.....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.1 Resultados obtidos nos ensaios de dureza.....	15
4.2 Resultados dos ensaios de desgaste.....	15
4.3 Resultados dos ensaios de impacto.....	16
4.4 Resultados dos ensaios de metalografia.....	16
4.5 Análise geral dos resultados obtidos.....	19
5. CONCLUSÕES.....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química em peso (%) das ligas.....	13
Tabela 2 – Durezas das ligas estudadas.....	15
Tabela 3 – Perdas de massa dos ensaios de desgaste.....	15
Tabela 4 – Energia absorvida (Charpy).....	16

LISTA DE IMAGENS

Figura 1. Microestrutura da Liga YE358.....	17
Figura 2. Microestrutura da Liga XD184.....	17
Figura 3. Microestrutura da Liga XF356.....	18
Figura 4. Microestrutura da Liga XF364.....	18

1. INTRODUÇÃO

A indústria de mineração é responsável por grande parte da demanda por materiais metálicos de alta resistência mecânica e elevada durabilidade. Em função das severas condições de operação, os equipamentos utilizados em processos de britagem, moagem e transporte de minérios estão constantemente expostos a esforços abrasivos e de impacto, resultando em desgaste acelerado de seus componentes. Esse fenômeno compromete a eficiência produtiva e eleva os custos de manutenção e substituição de peças, impactando diretamente na competitividade das empresas do setor.

A tribologia, ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação entre superfícies em contato, tem se mostrado fundamental para o desenvolvimento de materiais com desempenho superior em ambientes de alto desgaste. Nesse contexto, as ligas metálicas obtidas por processos de fundição representam uma alternativa eficiente e economicamente viável, uma vez que permitem o controle preciso da composição química e da microestrutura, além de possibilitarem tratamentos térmicos específicos para adequação das propriedades mecânicas.

Entre os elementos de liga empregados na fabricação de materiais resistentes ao desgaste, destacam-se o carbono, o cromo e o molibdênio, responsáveis pela formação de carbonetos duros que aumentam a dureza e reduzem a taxa de desgaste abrasivo. A variação desses elementos, aliada ao processo de tratamento térmico, influencia diretamente nas características microestruturais, promovendo diferentes combinações de dureza, tenacidade e resistência ao impacto.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento tribológico e as propriedades mecânicas de ligas fundidas com diferentes teores de carbono, cromo e molibdênio, desenvolvidas para aplicação em componentes da indústria de mineração. As amostras foram fundidas e tratadas termicamente, sendo submetidas a ensaios de dureza, impacto e desgaste, além de análises microestruturais. A comparação entre as ligas permitirá compreender a influência dos elementos de liga e do tratamento térmico sobre o desempenho final do material, contribuindo para o aprimoramento de soluções mais duráveis e eficientes no contexto industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desempenho dos componentes na indústria mineral

A maioria dos equipamentos utilizados nos processos de britagem e moagem na indústria de mineração tem seu desempenho fortemente condicionado pela resistência ao desgaste de seus componentes. De acordo com Machado e Sinátora (2015), o desgaste prematuro de partes críticas, como mandíbulas, martelos e revestimentos, pode comprometer a eficiência operacional e aumentar os custos de manutenção.

Segundo Máscia (2002) e Machado e Sinátora (2015), esse comportamento está diretamente relacionado à severidade das condições de trabalho e à natureza abrasiva dos minérios processados, que impõem altas solicitações mecânicas às superfícies metálicas. Assim, o desenvolvimento de ligas mais resistentes ao desgaste é fundamental para ampliar a vida útil dos equipamentos e reduzir o tempo de parada para substituição de peças.

2.2 Mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste são amplamente estudados na tribologia e podem ser classificados, segundo Torres (2019), em desgaste abrasivo, adesivo, por fadiga, corrosivo e erosivo. O desgaste abrasivo ocorre quando partículas duras deslizam ou rolam sobre a superfície do material, removendo pequenas porções de sua estrutura (PRENAZZI, 2022; e OLIVEIRA, 2015). De acordo com Torres (2019), o desgaste adesivo resulta da interação direta entre superfícies metálicas em contato, gerando transferência de material e perda volumétrica.

Já o desgaste por fadiga está associado à repetição de tensões cíclicas que provocam trincas superficiais. Como relatado por Torres (2019), enquanto o corrosivo envolve reações químicas entre o material e o ambiente, o desgaste erosivo é a perda progressiva da superfície do material, causada pelo impacto repetido de partículas num fluido (líquido ou gasoso).

Em ambientes de mineração, os mecanismos de abrasão e impacto são os mais predominantes, exigindo ligas de elevada dureza e tenacidade simultaneamente (MÁSCIA, 2002).

2.3 Influência da seleção de materiais na produtividade

A escolha adequada dos materiais utilizados em componentes sujeitos a desgaste possui impacto direto na produtividade dos processos de beneficiamento mineral. Trindade, Rossino e Silva, (2019), destacam que a utilização de ligas com desempenho tribológico inferior resulta em maior frequência de paradas, aumento de custo operacional e menor rendimento.

Por outro lado, Farah et al. (2025) e Machado e Sinátora (2015), afirmam que o uso de materiais de alta performance pode reduzir consideravelmente o custo por tonelada processada. Assim, a seleção de aços e ferros fundidos deve considerar não apenas o custo inicial, mas também a durabilidade e o comportamento sob as condições reais de operação.

2.4 Materiais aplicados em operações de mineração

Nas operações de extração e beneficiamento de minérios, diversos tipos de ligas metálicas são empregados para resistir às condições severas de desgaste. Entre os materiais mais utilizados estão os aços austeníticos ao manganês, os ferros fundidos alto cromo, os aços baixa liga temperados e revenidos, e o ferro fundido nodular austemperado (ADI) (MÁSCIA, 2002).

Segundo Farah et al. (2025) e Ribeiro (2020), os aços ao manganês, por exemplo, destacam-se por sua elevada tenacidade e capacidade de encruamento, sendo amplamente usados em mandíbulas e britadores. Já os ferros fundidos alto cromo apresentam excelente resistência à abrasão, devido à presença de carbonetos de cromo, embora apresentem menor resistência ao impacto, conforme relatam Pereira et al. (2020). O ferro fundido nodular austemperado, por sua vez, combina boa resistência ao desgaste com tenacidade superior, representando uma alternativa promissora em aplicações de impacto moderado (MÁSCIA, 2002).

2.5 Influência do tratamento térmico e da composição química

O tratamento térmico desempenha papel essencial na obtenção de propriedades adequadas para as condições de trabalho em mineração. A

variação dos parâmetros de aquecimento, têmpera e revenimento altera significativamente a microestrutura, influenciando diretamente a dureza e a resistência ao desgaste. Conforme ressaltado por Ribeiro (2020), o controle do tratamento térmico permite ajustar a proporção de fases duras e tenazes no material, alcançando melhor equilíbrio entre resistência e ductilidade.

E, segundo Farah et al (2025), pequenas alterações na composição química, principalmente nos teores de carbono e cromo, afetam a formação e a morfologia dos carbonetos e podem modificar o comportamento tribológico.

2.6 Efeito dos elementos de liga formadores de carbonetos

A adição de elementos formadores de carbonetos, como Cromo (Cr), Molibdênio (Mo), Nióbio (Nb), Titânio (Ti) e Vanádio (V), tem sido amplamente empregada para aprimorar a resistência ao desgaste de ligas fundidas. Esses elementos promovem a formação de carbonetos complexos e estáveis, que aumentam a dureza e reduzem a taxa de desgaste abrasivo (OLIVEIRA, 2015).

O molibdênio, em particular, contribui para a melhora da temperabilidade e da resistência à corrosão, além de atuar na estabilização dos carbonetos (MÁSCIA, 2002). O cromo, por sua vez, é o principal responsável pela formação de carbonetos duros do tipo M_7C_3 e $M_{23}C_6$, amplamente observados em ferros fundidos alto cromo, segundo os trabalhos de Trindade, Rossino e Silva, (2019) e Machado e Sinátora (2015). Esses autores também relatam que a quantidade de elementos de liga, combinada ao teor de carbono, tem influência direta na microestrutura final e, conseqüentemente, no desempenho tribológico do material. O aumento do carbono eleva a fração volumétrica de carbonetos, elevando a dureza, mas podendo reduzir a tenacidade.

Ou seja, o equilíbrio entre os elementos é, portanto, essencial para alcançar o comportamento desejado em termos de resistência ao desgaste e à fratura.

Assim, a compreensão da interação entre composição química, tratamento térmico e propriedades tribológicas é fundamental para o desenvolvimento de materiais otimizados, capazes de atender às rigorosas exigências da indústria de mineração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

As ligas estudadas neste trabalho foram desenvolvidas e fundidas pela Fundição Eduardo, localizada em Santa Cruz de la Sierra, Bolívia, responsável também pela usinagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos e tribológicos. O principal objetivo foi avaliar o comportamento de quatro ligas metálicas com diferentes teores de carbono (C), cromo (Cr) e molibdênio (Mo), além de uma liga de ferro fundido branco, utilizada como referência comparativa.

As amostras foram designadas como YE358, XD184, XF356 e XF364, cada uma apresentando composição química distinta conforme variação controlada dos elementos de liga.

A Tabela 1 apresenta a composição química em peso (%) das ligas analisadas, determinada por espectrometria de emissão óptica.

Tabela 1 – Composição química em peso (%) das ligas												
Liga	Elemento (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Fe
YE358	2,14	0,61	0,84	0,03	0,05	15,94	0,25	1,02	0,04	0,81	0,05	Bal.
XD184	0,60	0,64	1,01	0,03	0,02	2,55	0,07	0,22	0,03	0,08	0,08	Bal.
XF356	0,77	0,72	0,65	0,03	0,04	2,34	0,09	0,39	0,03	0,14	0,14	Bal.
XF364	0,91	0,76	0,82	0,03	0,02	2,14	0,07	0,26	0,03	0,08	0,01	Bal.

Fonte: Fundição Eduardo (2025).

Observa-se que as ligas apresentam teores variados de C (0,6–2,1%), Cr (2,1–15,9%) e Mo (0,2–1,0%), elementos que exercem papel fundamental na formação de carbonetos duros e na resistência ao desgaste abrasivo. A liga YE358, com maiores teores de C, Cr e Mo, é o ferro fundido branco, desenvolvido com foco na elevada dureza e alto desempenho em abrasivos severos, enquanto as ligas XD184, XF356 e XF364 apresentam combinações intermediárias voltadas ao equilíbrio entre resistência ao impacto e tenacidade.

3.2 Tratamentos térmicos

Após a fundição, as amostras foram submetidas a tratamentos térmicos controlados, também realizados pela Fundição Eduardo, com o objetivo de refinar a microestrutura e otimizar a resistência ao desgaste.

O processo consistiu em aquecimento em forno até a temperatura de solubilização adequada para cada tipo de liga, seguido de resfriamento ao ar forçado, e posterior revenimento para alívio de tensões.

A homogeneização térmica foi fundamental para garantir a uniformidade da microestrutura ao longo das seções analisadas.

A microscopia óptica foi utilizada para avaliar as mudanças microestruturais, identificando a presença de carbonetos e tipo de matriz.

3.3 Ensaios mecânicos e tribológicos

Para a caracterização das propriedades mecânicas e tribológicas, foram realizados ensaios padronizados conforme as normas técnicas ASTM. Os corpos de prova foram usinados com dimensões normalizadas e devidamente preparados para cada tipo de ensaio. Os ensaios realizados foram:

- Ensaio de dureza Rockwell (ASTM E18): determinou a dureza superficial das ligas, utilizando carga de 150 kgf com penetrador de diamante (escala C).
- Ensaio de desgaste abrasivo em roda de borracha (ASTM G65): simulou desgaste por atrito com partículas abrasivas (sílica) sob carga controlada.
- Ensaio de desgaste por abrasão com impacto: equipamento desenvolvido pela Fatec Sertãozinho, que reproduz condições de abrasão associada a impactos sucessivos, semelhante às operações de britagem.
- Ensaio de impacto Charpy (ASTM E23): avaliou a energia absorvida na fratura dos corpos de prova entalhados, permitindo correlacionar a tenacidade ao comportamento tribológico.
- Ensaio de metalografia (ASTM E3): amostras foram cortadas, embutidas, lixadas e polidas, conforme norma. Depois foi feito o ataque químico e o registro fotográfico, permitindo uma caracterização das microestruturas encontradas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados obtidos nos ensaios de dureza

Os valores médios de dureza obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Durezas das ligas estudadas

Amostras	Dureza (HRc)
YE358	60,5
XD184	51,2
XF356	36,8
XF364	40,2

Fonte: Autor (2025).

Nota-se que a liga YE358 apresentou o maior valor de dureza, confirmando a influência positiva dos altos teores de C, Cr e Mo no aumento da resistência à abrasão. A elevação da dureza nas ligas de alto cromo está diretamente relacionada à formação de carbonetos complexos e à transformação da matriz metálica em martensita após a têmpera.

Em contrapartida, ligas com menor teor de carbono e molibdênio apresentaram menor dureza, porém melhor comportamento sob impacto.

4.2 Resultados dos ensaios de desgaste

A análise dos ensaios de desgaste permitiu comparar o desempenho das ligas sob condições de abrasão pura (roda de borracha) e de abrasão combinada com impacto. Os resultados médios de perda de massa estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Perdas de massa dos ensaios de desgaste

Ensaio	Abrasão com Impacto (mg)	Roda de Borracha (mg)
YE358	688,3	36,7
XD184	643,3	143,7
XF356	636,7	97,1
XF364	621,0	97,6

Fonte: Autor (2025).

Os resultados indicam que a liga YE358, apesar da maior dureza, apresentou maior perda de massa no ensaio de abrasão com impacto, devido à sua maior fragilidade. Entretanto, no ensaio de roda de borracha, a mesma liga

mostrou excelente desempenho, confirmando sua elevada resistência ao desgaste abrasivo puro.

As ligas XF356 e XF364, com teores moderados de Cr e Mo, apresentaram comportamento intermediário, nos ensaios com abrasão e impacto, e maiores taxas de desgaste na roda de borracha, sugerindo um melhor equilíbrio entre dureza e tenacidade, adequado para aplicações em que há abrasão associada a impactos moderados.

4.3 Resultados dos ensaios de impacto

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de impacto (Charpy sem entalhe).

Tabela 4 – Energia absorvida (Charpy)

Amostras	Energia Absorvida (J)*
YE358	4,0
XD184	55,0
XF356	104,5
XF364	75,0

Fonte: Autor (2025).

Os resultados mostram que a amostra YE358, teve a menor energia de impacto, mostrando que ferros fundidos brancos possuem pouca ou nenhuma resistência ao impacto.

Quando avaliamos os demais resultados, nota-se que a relação entre a menor dureza e a menor energia absorvida se consolida.

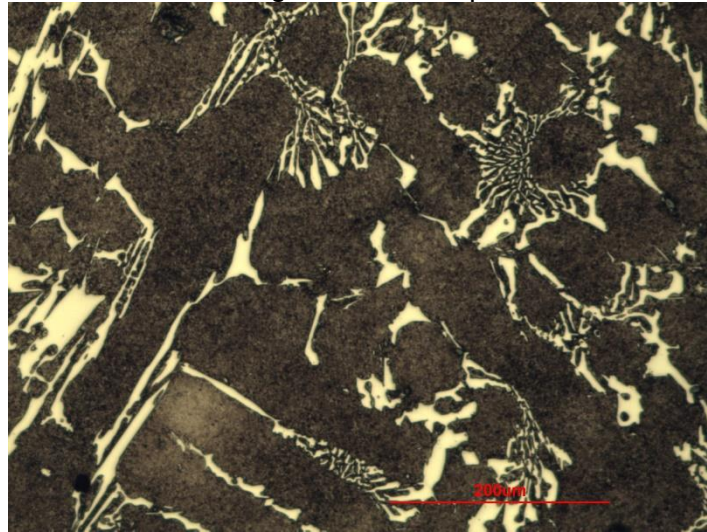
Entretanto, uma análise mais detalhada, relacionando os resultados, inclusive com a metalografia, deverá ser feita.

4.4 Resultados dos ensaios de metalografia

As amostras estudadas foram preparadas metalograficamente e sua microestrutura fotografada, para uma análise mais detalhada das fases presentes nas ligas desenvolvidas.

A Figura 1 mostra a microestrutura da liga YE358, polida e atacada quimicamente com o reagente Marble.

Figura 1. Microestrutura da Liga YE358. Ataque: Marble. Aumento: 100x.



Fonte: Autor (2025).

A microestrutura analisada é composta de martensita revenida (parte escura) e carbonetos de cromo eutéticos e primários (fase clara). Nota-se também uma estrutura dendrítica, típica de material fundido.

A Figura 2 mostra a microestrutura da liga XD184, polida e atacada quimicamente com o reagente Nital 2%.

Figura 2. Microestrutura da Liga XD184. Ataque: Nital 2%. Aumento: 200x.

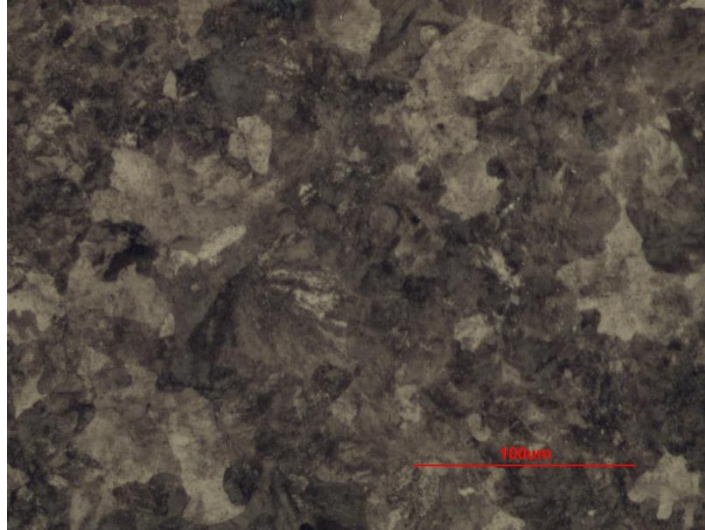


Fonte: Autor (2025).

A microestrutura analisada é composta predominantemente de martensita revenida. Há também pequena quantidade de austenita retida (fases claras).

A Figura 3 mostra a microestrutura da liga XF356, polida e atacada quimicamente com o reagente Nital 2%.

Figura 3. Microestrutura da Liga XF356. Ataque: Nital 2%. Aumento: 200x.

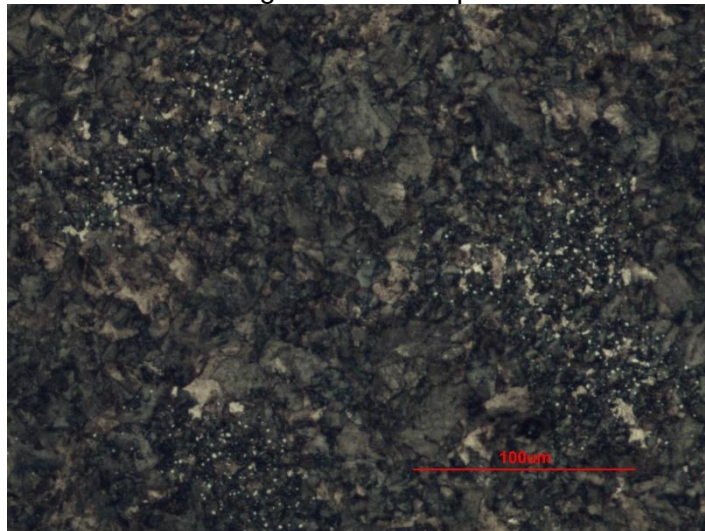


Fonte: Autor (2025).

A microestrutura analisada é composta de perlita fina. Nota-se também a presença de carbonetos primários (pequenos pontos claros).

A Figura 4 mostra a microestrutura da liga XF364, polida e atacada quimicamente com o reagente Nital 2%.

Figura 4. Microestrutura da Liga XF364. Ataque: Nital 2%. Aumento: 200x.



Fonte: Autor (2025).

A microestrutura analisada é composta predominantemente de perlita fina, com pequena quantidade bainita (fase pequena e mais escura). Nota-se também a presença de carbonetos primários (pequenos pontos claros).

As microestruturas das ligas analisadas ficaram coerentes com a composição química sugerida e pelo tipo de tratamento realizado.

4.5 Análise geral dos resultados obtidos

A avaliação das propriedades mecânicas e tribológicas das ligas fundidas permitiu compreender de forma clara os efeitos da variação de carbono (C), cromo (Cr) e molibdênio (Mo) sobre o comportamento em serviço dos materiais estudados.

A caracterização química apresentada na Tabela 1 confirma que as ligas foram projetadas com teores distintos desses elementos, de modo a gerar diferentes combinações microestruturais e propriedades mecânicas. A liga YE358, de maior teor de cromo (15,94%) e molibdênio (1,02%), foi desenvolvida para maximizar a resistência à abrasão, enquanto as ligas XD184, XF356 e XF364, com menores teores de Cr (2,14%–2,55%) e Mo (0,22%–0,39%), foram destinadas a avaliar o comportamento sob desgaste combinado com impacto.

A análise dos dados obtidos nos ensaios de dureza e de desgaste mostrou coerência com o esperado em termos de influência da composição química e dos tratamentos térmicos aplicados. A liga de alto cromo apresentou maior dureza, mas também maior tendência à fratura quando submetidas a impactos sucessivos, devido à presença de fases duras e frágeis.

Os resultados de dureza (Tabela 2) evidenciam diferenças significativas entre as amostras. A liga YE358 apresentou a maior dureza (60,5HRc), seguida pela XD184 (51,2HRc), enquanto as ligas XF356 (36,8HRc) e XF364 (40,2HRc) exibiram valores mais baixos.

Essas variações estão diretamente associadas à microestrutura formada durante o tratamento térmico. A YE358, com altos teores de Cr e Mo, apresentou uma matriz martensítica com carbonetos primários e secundários bem distribuídos, característica típica de ligas alto cromo tratadas termicamente. Essa combinação promoveu grande resistência à deformação plástica e, conseqüentemente, aumento expressivo na dureza superficial.

As ligas XD184 e XF364, de menor teor de Cr, mostraram microestruturas mistas, contendo perlita, bainita e martensita revenida, o que explica a menor dureza. No entanto, essa configuração microestrutural confere maior tenacidade e ductilidade, características desejáveis em condições de desgaste por impacto. E a liga XF356, apresentou-se completamente perlítica.

De forma geral, observou-se que o aumento do teor de cromo e molibdênio eleva a dureza, mas reduz a capacidade de absorção de energia durante impactos, indicando uma relação inversa entre dureza e tenacidade.

Os resultados dos ensaios de desgaste apresentados na Tabela 3, confirmam o impacto direto da dureza e da microestrutura no desempenho tribológico.

Nos ensaios de abrasão pura (roda de borracha), a liga YE358 apresentou o melhor desempenho, com perda de massa de apenas 36,7mg, resultado que comprova a influência positiva dos carbonetos de cromo e molibdênio na resistência ao desgaste abrasivo. Esses carbonetos atuam como barreiras rígidas que dificultam o corte das partículas abrasivas sobre a superfície metálica, reduzindo a taxa de remoção de material.

Por outro lado, nos ensaios de abrasão com impacto, a mesma liga apresentou a maior perda de massa (688,3mg), demonstrando fragilidade em condições que combinam abrasão e choques repetitivos. Isso ocorre porque as regiões ricas em carbonetos, apesar de duras, são mais suscetíveis à fratura sob esforços cíclicos, o que acelera o desgaste por destacamento de partículas.

As ligas XF356 e XF364 apresentaram comportamento intermediário, com perdas de massa entre 621mg e 636mg em abrasão com impacto, e cerca de 97 mg em abrasão pura. Esses resultados indicam uma melhor relação dureza/tenacidade, ou seja, uma estrutura mais equilibrada para situações em que ocorrem tanto abrasão quanto impacto, como nas operações de britagem secundária e transporte de minério.

A liga XD184, de menor teor de carbono e cromo, exibiu desempenho satisfatório em impacto (643mg), mas perda mais elevada no ensaio de roda de borracha (143mg), reforçando o papel fundamental da dureza, do teor de carbono e da formação de carbonetos no controle do desgaste abrasivo.

Ao correlacionar os dados de dureza com as perdas de massa observadas, constata-se que o aumento da dureza melhora significativamente o comportamento em desgaste abrasivo puro, mas pode comprometer o desempenho sob impacto.

Essa tendência está de acordo com os estudos citados, que destacam que ligas extremamente duras, embora resistentes à abrasão, se tornam mais frágeis e suscetíveis à fratura localizada em condições de impacto. Já as ligas

de menor dureza, com matriz bainítica ou perlítica, tendem a absorver melhor a energia do impacto, resistindo à propagação de trincas superficiais.

Portanto, o equilíbrio entre carbonetos duros e fases tenazes na microestrutura é determinante para o desempenho tribológico ideal. As ligas intermediárias, como XF364, mostraram-se as mais adequadas para aplicações onde há abrasão combinada com impacto, evidenciando comportamento estável e perda de massa reduzida.

A análise metalográfica revelou diferenças significativas na morfologia e distribuição dos carbonetos entre as ligas. As amostras de alto teor de Cr e Mo (YE358) apresentaram uma matriz martensítica com grande concentração de carbonetos interdendríticos do tipo M_7C_3 , distribuídos de forma contínua ao longo dos contornos de grão. Essa estrutura explica a alta dureza e a baixa resistência a impacto, pois as interfaces entre carbonetos e matriz atuam como pontos de concentração de tensão.

Já as ligas de baixo teor de Cr exibiram microestruturas mais equilibradas, compostas por uma matriz bainítica ou martensítica revenida (XD184 e XF364), com carbonetos mais finos e dispersos. Essa configuração contribui para um desgaste progressivo e não catastrófico, resultando em desempenho mais estável.

Nas amostras XF356, observou-se predominância de perlita, estrutura típica de ligas com baixo carbono e cromo. Apesar de apresentarem menor dureza, essas ligas são mais dúcteis e absorvem melhor impactos, o que explica sua boa performance nos ensaios de abrasão com impacto.

5. CONCLUSÕES

O aumento do teor de C, Cr e Mo promoveu a formação de carbonetos complexos, responsáveis pelo aumento da dureza e pela maior resistência ao desgaste abrasivo. Entretanto, a presença elevada desses carbonetos resultou em redução da tenacidade e, conseqüentemente, em desempenho inferior sob condições de impacto.

As ligas com alto cromo apresentaram matriz martensítica, enquanto as de baixo cromo e carbono exibiram microestruturas bainíticas e perlíticas, com maior capacidade de absorção de energia durante impactos.

A liga YE358, com teores de C, Cr e Mo mais elevados, apresentou a maior dureza, confirmando a relação direta entre teor de elementos formadores de carbonetos e resistência mecânica superficial. As demais ligas, com teores menores desses elementos, apresentaram durezas intermediárias, mas melhor equilíbrio entre dureza e tenacidade.

Nos ensaios de abrasão com roda de borracha, a liga YE358 apresentou o melhor desempenho, com a menor perda de massa. Entretanto, no ensaio de abrasão com impacto, a mesma demonstrou desempenho inferior devido à sua fragilidade frente a choques repetitivos. As demais mostraram comportamento mais estável, com desempenho equilibrado em ambos os ensaios, o que as torna mais adequadas para aplicações que envolvem abrasão combinada com impacto.

A análise comparativa entre as quatro ligas estudadas, incluindo uma de ferro fundido branco alto cromo, utilizada como referência, permitiu compreender a influência dos elementos de liga e dos tratamentos térmicos sobre o comportamento em desgaste e impacto.

Com base nos resultados obtidos, foi possível constatar que as microestruturas exercem papel determinante no desempenho dos materiais frente às condições severas de trabalho típicas da mineração.

Esses resultados reforçam a importância de se compreender a interação entre composição química, tratamento térmico e propriedades tribológicas para o desenvolvimento de ligas otimizadas, capazes de reduzir custos operacionais e aumentar a vida útil dos componentes metálicos utilizados na mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E3-95 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, USA: ASTM International; 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E18 – 15. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. 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. West Conshohocken, EUA, 2016.

FARAH, A., Martins, W., FARAH, S., GOMES, M., & BOLDRIN, E. L. Influência da microestrutura nas propriedades de ligas usadas em equipamentos de britagem e moagem de minérios. VIII SITEFA, 8(1), e8108. 2025. <https://doi.org/10.33635/sitefa.v8i1.343>

MACHADO, P. C.; SINATORA, A. Resistência à Abrasão do Aço Manganês Austenítico na Indústria de Mineração. In: 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador, 2015.

MÁSCIA, R. Desenvolvimento e Caracterização Tribológica de Materiais Resistentes ao Desgaste Abrasivo para Indústria Mineradora de Cassiterita. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

OLIVEIRA, C. G. de. Desenvolvimento e caracterização de liga de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio para uso em mineração. Dissertação (Mestrado), CEFET-MG, Belo Horizonte, 2015.

PEREIRA, N. F. S. et al. Análise do comportamento do par tribológico aço fundido alto C e alto Si contra o metal duro com e sem revestimento TiN. Journal of Experimental and Techniques Instrumentation – JETI, v. 4, n. 1, 2020.

PRENAZZI, G. C. Resistência ao Desgaste Abrasivo de Aços Inoxidáveis P410 e P420 Austenitizados em Diferentes Temperaturas e Temperados. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.

RIBEIRO, M. P. 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), UFRGS, Porto Alegre, 2020.

TORRES, W.C. Desenvolvimento e caracterização de aço fundido visando obtenção de microestrutura bainítica com refino microestrutural. Dissertação (mestrado), CEFET-MG, Belo Horizonte, 2019.

TRINDADE, A. B. M.; ROSSINO, L. S.; SILVA, G. N. Análise da variação do teor de manganês e cromo na resistência ao desgaste abrasivo dos aços austeníticos ao manganês Hadfield. In: 19º ENEMET - ABM Week, São Paulo, 2019.