



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

HELIARDO CORRÊA DEMETRIO

**ESTUDO SOBRE AS DIFERENTES LIGAS UTILIZADAS EM REVESTIMENTOS
METÁLICOS DAS PLACAS DE CHUTE NA USINA DE CARAJAS-PARÁ**

TUCURUÍ
2025

HELIARDO CORRÊA DEMETRIO

**ESTUDO SOBRE AS DIFERENTES LIGAS UTILIZADAS EM REVESTIMENTOS
METÁLICOS DAS PLACAS DE CHUTE NA USINA DE CARAJAS-PARÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, com requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Neves Garcia

TUCURUÍ

2025

HELIARDO CORRÊA DEMETRIO

**ESTUDO SOBRE AS DIFERENTES LIGAS UTILIZADAS EM REVESTIMENTOS
METÁLICOS DAS PLACAS DE CHUTE NA USINA DE CARAJAS-PARÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, com requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Neves Garcia

Data de aprovação: ___/___/___

Conceito:

Banca Examinadora:

Dr. Douglas Neves Garcia
Universidade Federal do Pará

Dr. Wassim Raja El Banna
Universidade Federal do Pará

Eng. Anderson Sousa dos Santos

Vale S.A

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão a Deus por ter alcançado este marco significativo em minha vida, a realização de um sonho que só foi possível graças ao apoio incondicional de pessoas queridas.

Agradeço especialmente às minhas irmãs e à minha tia Antônia, cujo apoio e orientação foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios e alcançar meus objetivos. Sua crença em minha capacidade e seu incentivo constante foram essenciais em minha trajetória.

Minha irmã Helen Vitória e minha mãe merecem uma menção especial por nunca terem duvidado de mim e por terem me apoiado em cada etapa de minha jornada acadêmica. Seu amor e confiança foram fundamentais para que eu pudesse chegar a este momento.

Agradeço também aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica, que contribuíram de maneira significativa para minha formação acadêmica e profissional. Em especial, expresso minha gratidão ao Professor Maciel Furtado, que me proporcionou a oportunidade de desenvolver o projeto de manutenção em motores — experiência que não apenas enriqueceu meu currículo, mas também contribuiu para meu crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço à minha esposa, Leonice Brandão, por seu apoio incondicional e compreensão durante toda a minha jornada acadêmica. Sua presença e incentivo foram essenciais para que eu pudesse superar os obstáculos e alcançar meus objetivos.

A todos que contribuíram, de alguma forma, para que este momento se tornasse realidade, deixo registrada minha sincera gratidão. E, acima de tudo, agradeço a Deus por nunca me ter desamparado e por me conceder a força e a determinação necessárias para alcançar meus objetivos.

RESUMO

Este estudo foca na mitigação do desgaste em equipamentos de mineração, um problema que gera altos custos de manutenção e perdas de produção. A tribologia, que estuda o atrito e o desgaste, é a base científica para essa abordagem. O objetivo geral é realizar uma análise bibliográfica sobre a aplicação de ligas de revestimento duras em componentes como os chutes de transferência, que sofrem desgaste intenso devido ao impacto e à abrasão do minério. O trabalho busca demonstrar como materiais mais avançados podem prolongar a vida útil dos equipamentos, reduzir custos e aumentar a eficiência operacional. A metodologia se baseia no ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) e em um levantamento bibliográfico em bases de dados indexadas. Inicialmente, foram pesquisados artigos sobre o desempenho de revestimentos à base de tungstênio e carbeto de tungstênio, bem como a aplicação do ciclo PDCA em mineração. Os dados de dureza, taxa de desgaste e resistência ao impacto foram comparados entre a HX900 e outros materiais como aços endurecidos e cerâmicas. O uso da chapa HX900 em chutes de transferência proporcionou ganhos significativos de durabilidade. Testes de campo em usinas de mineração revelaram que a HX900 pode superar em até 38 vezes a vida útil de materiais convencionais, como o aço Hardox 400. Além de prolongar a vida útil, a instalação da chapa trouxe benefícios como a redução das manutenções preventivas e a otimização do fluxo de minério. A microestrutura da HX900, com sua combinação de dureza e tenacidade, alinha-se a revestimentos de WC-Co (carbeto de tungstênio-cobalto) e oferece um equilíbrio superior para absorver tanto a abrasão quanto o impacto. Além disso, a sua produção com materiais reciclados contribui para a sustentabilidade ambiental. Em conclusão, a aplicação de revestimentos à base de tungstênio como a chapa HX900 em chutes de transferência se mostra uma solução robusta e eficiente para o desgaste na indústria de mineração. A combinação de elevada dureza e tenacidade do compósito otimiza o desempenho tribológico, superando materiais tradicionais.

Palavras- Chave: Desgaste, Materiais, Mineração.

ABSTRACT

This study focuses on mitigating wear in mining equipment, a problem that generates high maintenance costs and production losses. Tribology, which studies friction and wear, is the scientific foundation for this approach. The general objective is to conduct a literature review on the application of hard coating alloys in components such as transfer chutes, which undergo severe wear due to ore impact and abrasion. The work seeks to demonstrate how advanced materials can extend equipment lifespan, reduce costs, and increase operational efficiency. The methodology is based on the PDCA cycle (Plan-Do-Check-Act) and a bibliographic survey in indexed databases. Initially, articles were reviewed on the performance of tungsten- and tungsten carbide-based coatings, as well as the application of the PDCA cycle in mining. The HX900 plate, a material composed of nodular cast iron with tungsten carbide granules, was the main focus of analysis. Hardness data, wear rate, and impact resistance were compared between HX900 and other materials such as hardened steels and ceramics. The use of the HX900 plate in transfer chutes provides significant durability gains. Field tests in mining plants revealed that HX900 can outperform conventional materials such as Hardox 400 steel by up to 38 times in terms of service life. In addition to extending lifespan, the installation of the plate brought benefits such as reduced preventive maintenance and optimized ore flow. The microstructure of HX900, with its combination of hardness and toughness, aligns with WC-Co (tungsten carbide–cobalt) coatings and offers a superior balance to withstand both abrasion and impact. Furthermore, its production with recycled materials contributes to environmental sustainability. In conclusion, the application of tungsten-based coatings such as HX900 plates in transfer chutes proves to be a robust and efficient solution to wear in the mining industry. The combination of high hardness and toughness of the composite optimizes tribological performance, surpassing traditional materials. It is recommended to standardize the use of HX900 and conduct future laboratory tests to experimentally validate the predictions, promoting a continuous cycle of improvement and innovation in the sector.

Keywords: Wear, Materials, Mining.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVO	9
2.1. Objetivo Geral	9
2.2. Objetivos Específicos	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. Cadeia produtiva do minério.....	10
3.2. Chutes de transferência	11
3.3. Critérios de design dos chutes de transferência	12
3.4. Mecanismos de desgaste	14
3.5. Microestrutura e Resistência ao desgaste	14
3.6. Classificação do Desgaste por Abrasão	19
3.7. Desgaste por erosão	19
3.8. Chapas HX900.....	20
3.9. Desgaste em chutes de transferência	21
3.10. Deposição De Revestimentos Duros Por Soldagem	23
4. METODOLOGIA	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

O desgaste representa uma das principais fontes de custo na indústria de beneficiamento mineral. Entender detalhadamente os mecanismos que atuam nesse processo complexo é essencial para escolher os materiais corretos e, com isso, reduzir gastos operacionais. Essa compreensão exige uma abordagem científica mais precisa, em contraste com o modelo empírico, baseado em tentativa e erro, que ainda é comum no setor industrial.

Esse fenômeno está amplamente presente em processos industriais, especialmente nas etapas de exploração e tratamento de minérios e seus derivados. Desgaste, conforme definição, é o dano progressivo sofrido pelas superfícies sólidas, causado pelo movimento relativo entre uma superfície e um material abrasivo (GAHR, 1987).

No setor mineral, o atrito e o desgaste impactam diretamente os custos de manutenção. A substituição frequente de componentes da cadeia produtiva não apenas eleva os gastos operacionais, como também intensifica os impactos ambientais (RATIA; MIETTUNEN; KUOKKALA, 2013). Assim, avanços tecnológicos nesse campo são fundamentais para aumentar a eficiência e a competitividade da mineração na era da Indústria 4.0 (HOLMBERG, 2017). Equipamentos responsáveis pela movimentação de grandes volumes de minério sofrem com desgaste acelerado, o que antecipa o fim de sua vida útil. Isso acarreta paradas não programadas, perda de eficiência produtiva, redução de lucro e até riscos à segurança das operações (SINATORA, 2005).

Dentro desse cenário, os transportadores de correia destacam-se como soluções eficientes na mineração. Um de seus principais componentes, os chutes de transferência, sofre desgaste intenso devido ao impacto direto com o minério. Para protegê-los, aplicam-se placas de revestimento com alta resistência ao desgaste (Li *et al.*, 2021). Devido à necessidade constante de substituição dessas placas, avaliam-se materiais mais duráveis e eficientes, capazes de resistir tanto à abrasão quanto ao impacto (CHEN; BISWAS; ROBERTS; O'SHEA; WILLIAMS, 2017).

Nesse tipo de sistema, predominam os desgastes por abrasão e erosão, causados pelo impacto e deslizamento das partículas do minério (GATES, 2015). Reproduzir com fidelidade essas condições em laboratório continua sendo um desafio técnico (GATES, 2015). Os testes laboratoriais oferecem maior controle, são menos

custosos e utilizam pequenas amostras. Em contrapartida, os ensaios de campo envolvem variáveis mais complexas, altos custos e paradas de produção (BLICKENSDEFER, 1988). Para unir esses dois mundos, é necessário desenvolver testes laboratoriais que simulem fielmente os mecanismos reais de desgaste. Assim, os ensaios de campo podem validar as metodologias (GAHR, 1987).

O estudo busca contribuir para a seleção eficiente de diferentes ligas: Ferro Fundido Branco (FFB) com alto teor de cromo, ferro fundido nodular com insertos de metal duro (WC-Co), cerâmica de 92% alumina (Al_2O_3), aço com revestimento por solda (Cr) e aço ferramenta martensítico (H13). Os dados obtidos apontam qual desses materiais possui maior resistência, ampliando a vida útil dos equipamentos, reduzindo a frequência de manutenções e prevenindo paradas inesperadas.

A proposta de utilizar tungstênio como material de revestimento surge como uma solução inovadora, dado suas propriedades excepcionais de dureza e resistência ao desgaste. A análise detalhada do comportamento desse material em condições reais de operação pode contribuir significativamente para a redução de custos e aumento da eficiência na mineração, tornando este tema altamente relevante para o desenvolvimento de soluções tecnológicas na indústria.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo bibliográfico sobre os materiais (ligas) empregadas nos revestimentos duros aplicados por soldagem em componentes submetidos ao desgaste no setor de mineração.

2.2. Objetivos Específicos

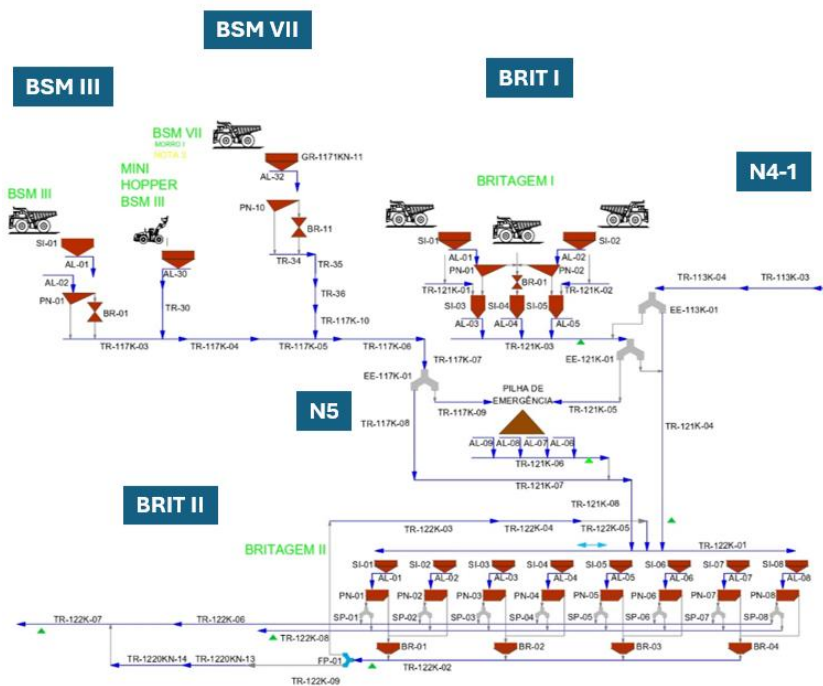
- Analisar a variação da vida útil de revestimentos em chutes de transferência em função
 - Analisar a influência da dureza, da microestrutura e da composição química das ligas de revestimento sobre o comportamento ao desgaste
 - Avaliar se as ligas analisadas atendem aos parâmetros de desgaste do sistema tribológico dos chutes de transferência de minério de ferro
 - Apresentar a comparação entre as diferentes ligas utilizadas hoje na mineração
 - Caracterizar o sistema tribológico atuante no conjunto mecânico dos chutes de transferência de minério durante a interação do fluxo de partículas de minério com a superfície dos materiais de revestimento e analisar comparativamente da placa de revestimento de tungstênio aos demais modelos já utilizados na mineração

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Cadeia produtiva do minério

As principais matérias-primas do aço são extraídas, beneficiadas e transportadas por diversos equipamentos com a presença de atrito e desgaste entre componentes mecânicos e minério. As rotas de manejo são compostas, em grande parte, por transportadores de correia, compostos por correias transportadoras e chutes de transferência, conjunto denominado conhecido também por bancada transportadora. Um exemplo de rota percorrida pelo minério de ferro durante o beneficiamento é ilustrado na Figura 1 (VALE, 2025).

Figura 1: Fluxo do processo de beneficiamento de minério



Fonte: Acervo Técnico Vale (Acesso: 08/07/2025)

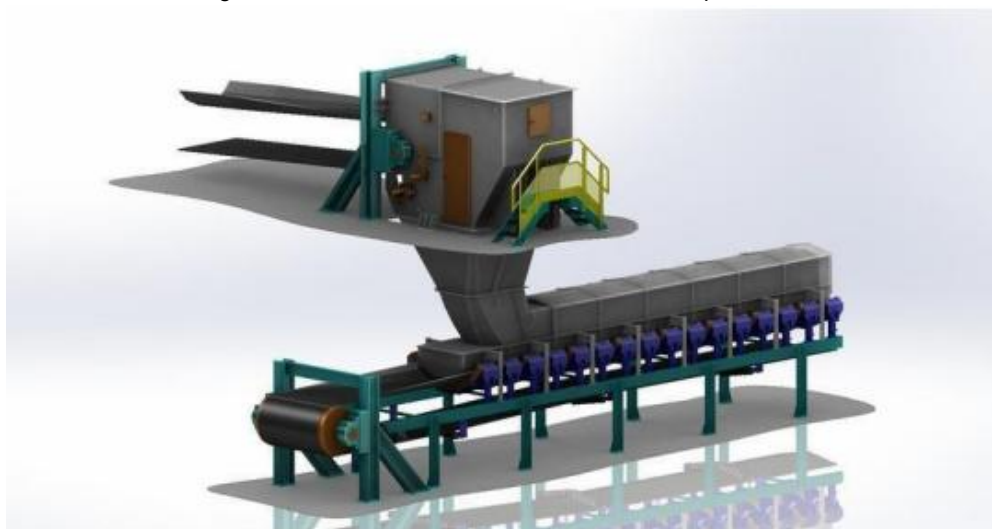
Nota-se a gama de diferentes etapas e equipamentos envolvidos no processamento do mineral extraído e a presença crucial das bancadas transportadoras no sistema, responsáveis por grande parte do transporte em minas e usinas e, nos portos por exemplo, responsáveis e presentes na totalidade das realocações do produto, até sua exportação. O manuseio contínuo do minério envolve não apenas rotas unidirecionais, mas também pontos de alimentação e redirecionamento com possível variação de altura, onde são empregados os chutes de transferência.

As operações de manuseio de minério de ferro em grande escala apresentam excesso de desgaste nos componentes transportadores, causador de falhas precoces nos equipamentos e, conseqüentemente, altos custos com manutenção e atrasos provenientes das paradas indesejadas. Sendo assim, a seleção e melhoria de materiais e dos processos de fabricação das placas de revestimento dos chutes tem foco na mitigação das perdas por desgaste, tal como toda atividade minerária e metalúrgica (SINATORA, 2005).

3.2. Chutes de transferência

O sistema logístico envolto ao minério de ferro trouxe desafios para a engenharia que se renovam constantemente, frente as necessidades de reduzir custos, demanda e produção crescentes. O advento das correias transportadoras trouxe maior facilidade às operações, vista sua possível adaptação para diferentes terrenos e situações. Posteriormente, as limitações de curvas das correias e a necessidade de variar a velocidade do material transportado foram supridas pela adição de um componente ao sistema: os chutes de transferência (ROBERTS, 2001). Um exemplo de bancada transportadora é visualizado na Figura 2.

Figura 2: Modelo virtual de uma bancada transportadora



Fonte: Site Grabcad Community (Acesso: 08/07/2025)

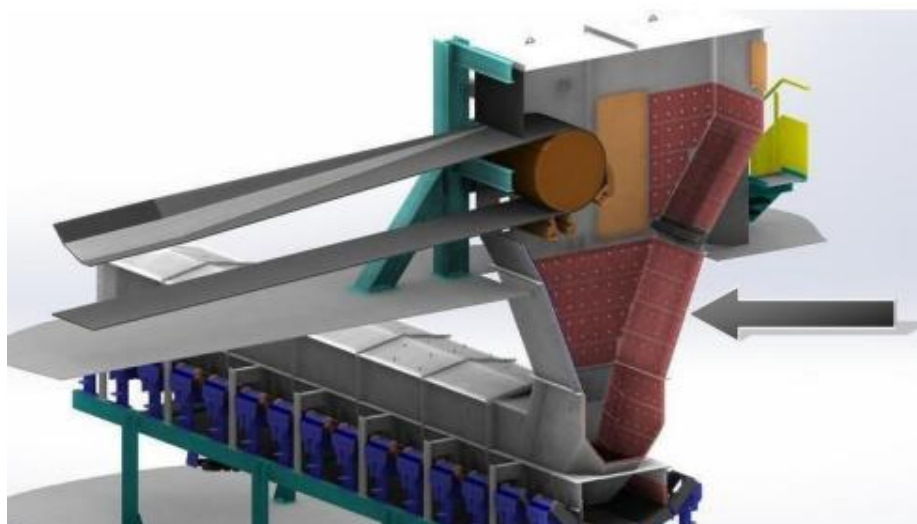
Considerado elemento crucial dos conjuntos de bancadas transportadoras (Figura 2), os transportadores de correia são responsáveis pelo escoamento e redirecionamento contínuo do minério de ferro para as próximas etapas do processo industrial. Amplamente utilizados em processos à seco, as condições de trabalho à

que são submetidos envolvem diversas variáveis, entre elas estão a quantidade de material passante, ângulos de incidência, diferença de nível entre as etapas e velocidade de queda do minério (SILVA, 2016).

Na Figura 3 o modelo do equipamento permite visualizar os diferentes níveis de disposição de correias transportadoras e direções de fluxo entre elas. Os chutes são projetados de maneira a impedir o impacto no transportador inferior ou mesmo a projeção de minério para fora do sistema, reduzindo a velocidade do minério de ferro até a próxima etapa com sua geometria (MESQUITA, 2017).

A solução usual para amenizar o desgaste sofrido pelos chutes de transferência e evitar vazamentos subsequentes é o emprego de placas de revestimento em suas partes internas, constituídas por materiais resistentes da engenharia e capazes de estender a vida útil do equipamento (GATES, 2003).

Figura 3: Revestimento interno de chute de transferência



Fonte: Site Grabcad Community (Acesso 08/07/2025)

3.3. Critérios de design dos chutes de transferência

Neste tópico é discorrida a importância da etapa de projeto dos equipamentos, onde são feitas considerações de geometria, revestimentos e ângulos de impacto. Existem fatores independentes que determinam a eficácia do processo de transporte por chutes de transferência: as propriedades do minério e sua vazão são parâmetros importantes para análise do sistema (ROBERTS, 2001).

Para melhor exercerem sua função na cadeia logística do minério e diminuir os custos com manutenção, reposição e entupimentos de fluxo, critérios de design foram

desenvolvidos a fim de otimizar o uso dos chutes de transferência na indústria (ILIC, 2019). Alguns conceitos de projeto que interferem na eficácia do equipamento são: altura e geometria da estrutura, propriedades mecânicas dos materiais de revestimento relacionadas à baixa fricção e alta resistência ao desgaste, o ângulo de impacto do minério nas placas e a velocidade do fluxo de materiais (GATES, 2003). A não aplicação ou aplicação incorreta destes critérios gera custos financeiros e ambientais para a operação (HOLMBERG, 2017).

Os revestimentos internos dos chutes podem ser dispostos de diferentes maneiras, visando maior eficiência de transporte, com menor desgaste dos componentes e fluxo ininterrupto de material. Em seu trabalho de desenvolvimento de critérios para design de chutes de transferência, Dusan Ilic abordou quatro modelos (Figura 4) em simulações de carregamento, que possibilitou visualizar a influência destas características estruturais no desempenho dos equipamentos (ILIC, 2019).

Figura 4: Simulação de design de Chute de transferência

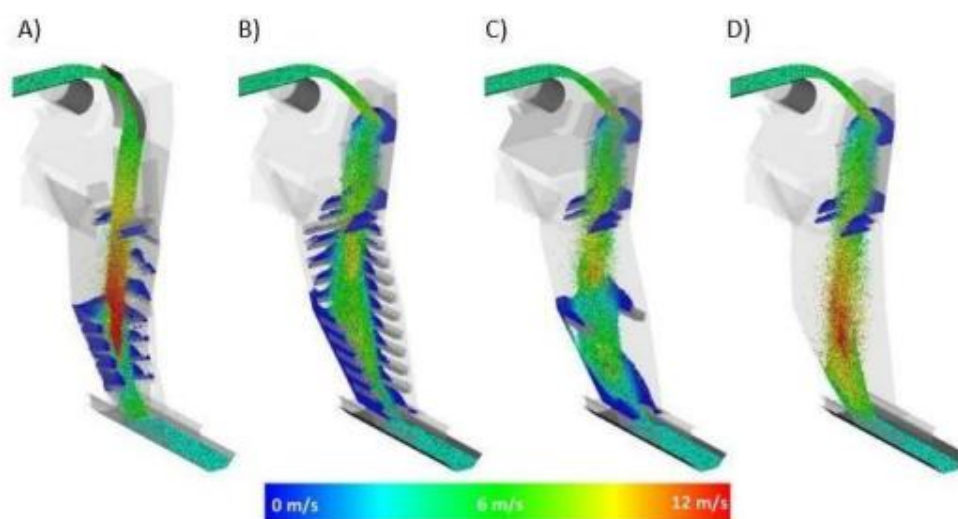


Tabela 1: Descrição de design entre os chutes de transferência na Figura 4.

Varição	Descrição
A	Defletor Curvo, Chute 70°
B	Defletor de caixa de rocha, calha de 60°, calha de carga reta de 45°
C	Igual à B, mas apenas uma borda no meio
D	Defletor Rock-box, Colher de Carga Curvada, Corte de 45°

Fonte: (ILIC, 2019)

Apesar dos critérios já desenvolvidos para aprimorar as aplicações dos chutes em diversas indústrias, as severas condições de operação e diferentes tipos de

carregamento à que são submetidos ainda apresentam desafios para a seleção de materiais (HOCKE, 1973; ROBERTS, 2001; ILIC, 2019).

3.4. Mecanismos de desgaste

De acordo com a norma DIN 50320 (DIN 50320, 1979) os mecanismos de desgaste podem ser classificados em quatro categorias principais. São elas: adesão, abrasão, reação triboquímica e fadiga como podemos ver na figura 5.

- Adesão: Formação de pontos adesivos interfaciais.
- Abrasão: Remoção de material devido à arrancamento.
- Fadiga: Fadiga e formação de trincas nas regiões da superfície devido a tensões cíclicas, resultando em separação de material.

Além da classificação normativa, existem também vários termos referentes aos tipos de ações na interface de um corpo sólido. Em função do movimento de interfaces, elas variam entre deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, dependendo da cinemática presente no sistema (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Figura 5: Desgaste do Revestimento (CDP Fe-Cr-C) por abrasão



Fonte: Autoria Própria (Acesso 08/07/2025)

3.5. Microestrutura e Resistência ao desgaste

A maioria dos materiais empregados em aplicações tribológicas necessita de uma elevada resistência a algum tipo específico de desgaste, dependendo da aplicação a que se destina. Tais materiais, geralmente polifásicos, possuem altas

porcentagens de precipitados ou fases dispersas, cuja dureza está na mesma ordem de grandeza ou superior à das partículas abrasivas. As fases destes materiais são os principais responsáveis pelo aumento substancial na resistência ao desgaste, enquanto a matriz assegura a necessária tenacidade e ligação entre as fases (SHAKELFORD, 1996).

A microestrutura dos revestimentos tem um papel importante no desempenho em relação à resistência ao desgaste, principalmente a microestrutura formada por fases duras ou carbonetos duros. Fatores como composição da liga e do tratamento térmico influenciam na formação de distintos carbonetos, como MC, M₆C, M₇C₃, M₂₃C₆ e Cr₂C₃, onde M representa um ou mais tipos de átomos metálicos e C carbono (LIMA, 2008).

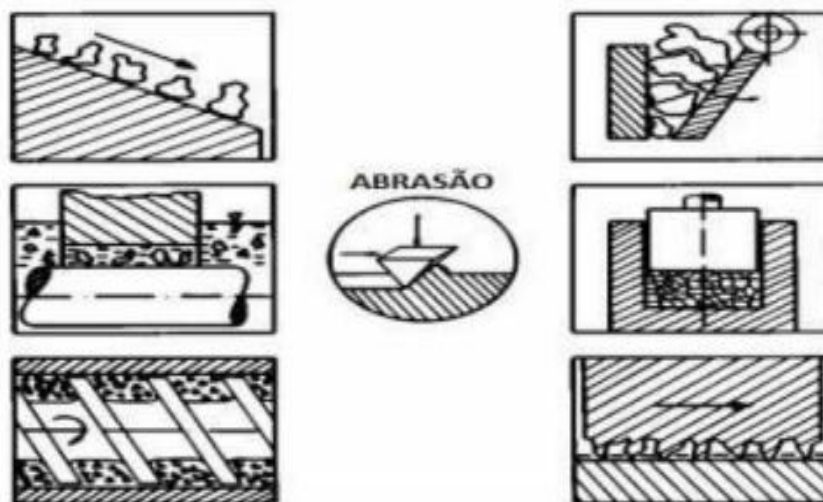
Segundo Gregory e Bartle (1980), o aumento da dureza não necessariamente aumenta a resistência ao desgaste. Exemplo disso, é a comparação de materiais diferentes com a mesma dureza: um aço de construção tratado termicamente e um revestimento duro 25 apresentaram perda de massa diferentes sendo menor para o revestimento duro, estando este comportamento relacionado com a microestrutura. Fatores como fase mais dura (Martensita) ou carbonetos duros são preponderantes na microestrutura para a melhoria da resistência ao desgaste em revestimentos. Scotti e Rosa (1997) citam que a dureza dos revestimentos é mais influenciada pela microestrutura, que por sua vez, depende do calor imposto e da composição química. Embora se espere que revestimentos com maior dureza tenham conseqüentemente maior resistência ao desgaste, observam-se algumas contradições na literatura corrente.

Outro fator importante é a quantidade de carbono no material para a confecção do revestimento. Chang et al. (2009) verificaram que, em revestimentos hipereutéticos de Fe-CrC, o percentual de Carbono influencia na fração volumétrica de carbonetos de materiais com o mesmo percentual de elementos formadores de carbonetos. Foi verificado que materiais com maior percentual de carbono apresentam mais carbonetos por unidade de área, porém com tamanhos menores e materiais com menor percentual de carbono apresentam carbonetos primários de tamanho maior. Os revestimentos que apresentaram maior percentual de Carbono foram responsáveis por apresentar maior dureza devido a maior quantidade de carbonetos do tipo (Cr, Fe)₇C₃.

3.6. Classificação do Desgaste por Abrasão

O desgaste por abrasão acontece quando partículas duras entram na interface de movimento de corpos relativos, podendo ser provenientes de processos produtivos ou fragmentos de materiais removidos durante trabalho, que assumem a mesma posição de elemento abrasivo do sistema (GAHR, 1998). Em sua grande maioria, equipamentos mecânicos industriais sofrem com o desgaste abrasivo durante operação. Alguns tribossistemas onde o desgaste por abrasão é predominante são apresentados na Figura 6.

Figura 6: Abrasão em sistemas mecânicos e tribológicos

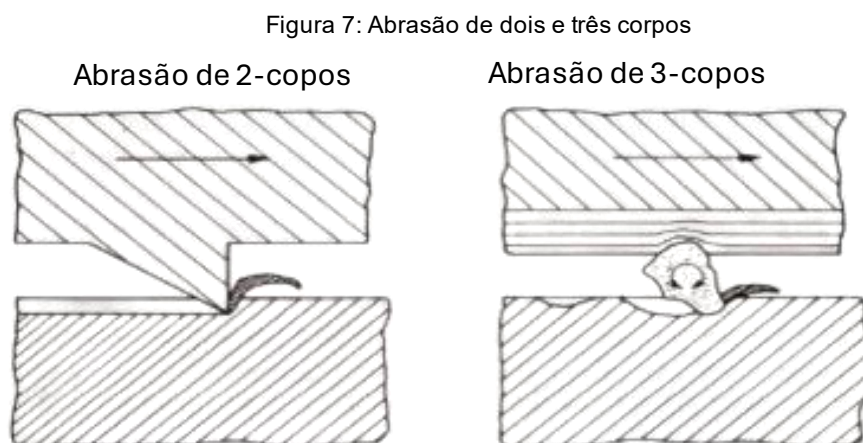


Fonte: (GAHR, 1987)

Os processos de desgaste por abrasão podem ser classificados também quanto ao número de triboelementos, chamado de desgaste a dois corpos quando composto apenas por dois elementos e desgaste a três corpos quando sob ação de partículas sólidas pressionadas entre superfícies, conforme pode-se observar na Figura 7, ilustrado por Zum Gahr em seu livro "Microstructure and wear of materials" (GAHR, 1987).

Abrasão entre dois corpos: as partículas abrasivas ou asperezas são animadas de movimento relativo em relação à superfície do material. Marcas e riscos são formados paralelamente à direção de deslocamento destas partículas, conforme ilustrado na Fig.7 (a) KÖNIG et. al. (2007).

Abrasão entre três corpos: as partículas abrasivas agem como elementos interfaciais entre duas superfícies em movimento relativo. As partículas estão livres na interface, deformando plasticamente as superfícies de contato, conforme apresentado na Fig.7 (b) KÖNIG et. al. (2007)



Fonte: Adaptado de GAHR, 1987

Budinski (1988) e Davis (2001) classificam o desgaste abrasivo baseados na quantidade do dano exercido sobre a superfície, tais como: Abrasão a baixa tensão, Abrasão a alta tensão, abrasão por arranque e Polimento

Abrasão a baixa tensão: É definida como o desgaste que ocorre pelo contato entre as pequenas partículas abrasivas e o metal, levando a um sulcamento da superfície. O critério estabelecido para a abrasão a baixa tensão é que as forças devem ser o suficientemente baixas para evitar o esmagamento do abrasivo. Esse tipo de abrasão ocorre frequentemente na superfície de equipamentos que direta ou indiretamente manuseiam terras, areias, minérios ou carvão, tais como, máquinas agrícolas, equipamentos de escavação, transporte, manuseio de minérios etc.

Abrasão a alta tensão: É o desgaste produzido sobre um nível de tensão elevado que é capaz de esmagar o abrasivo, aumentando a dureza por deformação na superfície. Nesta o abrasivo é forçado a penetrar entre as superfícies de dois metais e, por serem três os elementos envolvidos é também denominada de “abrasão a três corpos”.

Abrasão por arranque: É caracterizada pela ação de impacto que as partículas submetem à superfície do metal, produzindo desta forma, a remoção. Este tipo de

desgaste se apresenta em peças como as camisas dos trituradores, martelos de impacto, pulverizadores etc. a deformação plástica é um dos fatores dominantes neste tipo de abrasão.

Na figura 8 pode-se ver diferença de abrasividade entre os tipos de sistemas de desgaste abrasivo que foi conceituada em 1987 por Gahr, ao perceber a diferença de comportamento de materiais sólidos homogêneos e heterogêneos. Os materiais homogêneos conferem menor severidade de abrasão quando a relação de durezas da superfície e do abrasivo são semelhantes e alta severidade quando a dureza do abrasivo for pelo menos 1,2 vezes maior que a da superfície (GAHR, 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Quando analisados os materiais heterogêneos que possuem matriz mole e segunda fase mais dura, a severidade será menor enquanto o abrasivo apresentar menor dureza que a fase dura do material (GAHR, 1987). Posto isso, os desgastes por abrasão foram classificados em (GAHR, 1987):

Figura 8: Abrasão de dois e três corpos (CHOKBAR Fe-Cr-C).



Fonte: Acervo Técnico Vale (Acesso 08/07/2025)

As características como tamanho, morfologia, distribuição espacial e fração volumétrica dos carbonetos influenciam diretamente o desempenho tribológico do revestimento. Carbonetos bem distribuídos e de dimensões adequadas reduzem a fragmentação e destacamento, evitando que se tornem abrasivos secundários. Além disso, a presença de elementos de liga como Nb, Mo, V e Ti pode favorecer a formação de carbonetos mais duros e refinados, resultando em microestruturas mais resistentes e estáveis sob condições severas de desgaste. Dessa forma, a

combinação entre o processo de soldagem adequado e uma microestrutura otimizada garante maior vida útil e eficiência operacional das placas de desgaste (Cruz-Crespo *et al.*, 2016).

3.7. Desgaste por erosão

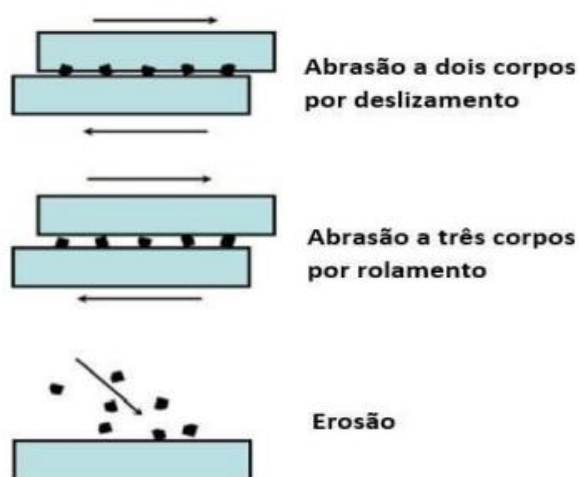
O desgaste erosivo ocorre quando partículas duras, transportadas por fluxo de gás ou líquido, atingem uma superfície sólida causando interações entre o abrasivo e os corpos do tribossistema. A severidade do desgaste está diretamente ligada ao tamanho das partículas que colidem, o ângulo de incidência, a velocidade de impacto e as propriedades do material alvo (GAHR, 1998).

Também definido por Peter Blau (1995) como sendo o “desgaste por perda progressiva de material de uma superfície sólida devido a interação mecânica com um fluido multicomponente ou impacto de líquido ou partículas sólidas. Como apresentado por Ian Hutchings e Philip Shipway, as partículas sólidas podem ser carregadas por gases, fluidos ou induzidas pela cinemática de transportadores mecânicos, sendo intrínsecas ao sistema (ex.: material transportado) ou não (ex.: contaminantes).

Existem também situações em que a oxidação ou desgaste dos equipamentos interpõem as partículas responsáveis pela erosão (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

As diferenças entre os tribossistemas de abrasão a dois corpos, três corpos e por erosão podem ser identificadas na Figura 9.

Figura 10: Diferenças entre abrasão 2-corpos, abrasão 3-corpos e erosão.



A presença das partículas duras não é deletéria a todos os processos, sendo comumente empregadas em operações de moagem e polimento, nos quais as características de forma, tamanho e dureza são controladas para obtenção do produto desejado. As interações dos abrasivos com superfícies sólidas podem acompanhar mecanismos de adesão, abrasão, deformação, aquecimento, fadiga superficial e fratura (GAHR, 2005).

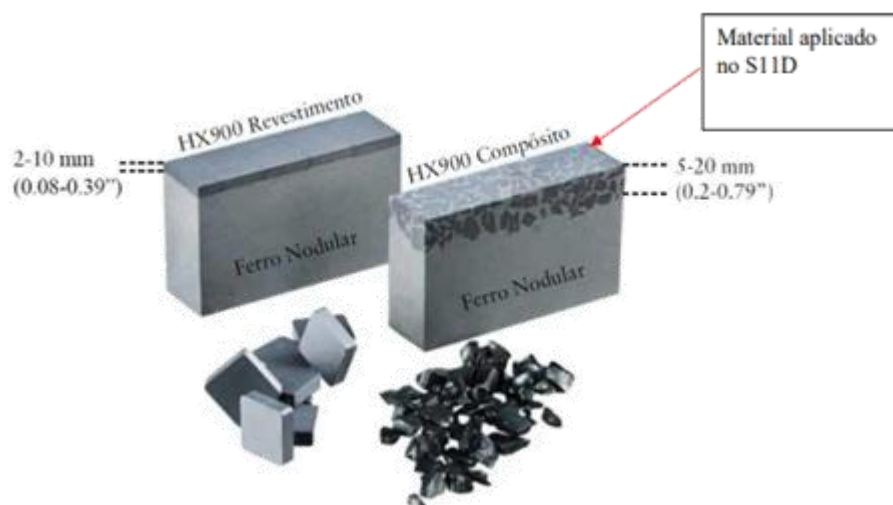
3.8. Chapas HX900

As Chapas HX900 são um material, desenvolvido pela Sandvik EM 2020. De acordo com o fabricante a mesma une a resistência ao desgaste de carbeto cimentados — predominantemente à base de carbeto de tungstênio — com a tenacidade do ferro nodular (ferro dúctil) para formar uma solução de proteção altamente performática, adequada a aplicações que exigem alta resistência à abrasão e grandes impactos (Sandvik, 2025). foi escolhido o HX 900 compósito que tem uma resistência ao impacto alto e os grânulos estão distribuídos na região de desgaste proporcionando também uma boa resistência.

Essa combinação permite que HX900 apresente uma durabilidade até 20 vezes maior que a de aços revenidos (500 HB) e 5 vezes superior à dos aços brancos, além de manter entre 80% a 90% da tenacidade do ferro nodular. Os carbeto cimentados oferecem dureza extrema, enquanto o ferro nodular concede ductilidade e absorção de energia, tornando-se ideal para ambientes severos com desgaste intenso e impacto repetitivo. A produção de HX900 está alinhada com práticas sustentáveis: utiliza 100% de carbeto cimentados reciclados internamente e 99% de ferro nodular reciclado, o que reduz o consumo de energia em cerca de 70% e as emissões de CO₂ em 40% (Sandvik, 2025).

Os materiais HX 900 é produzido sob a forma de compósito ou revestimento. O método de fundição usado nos dois casos promove uma ligação metalúrgica entre os grânulos ou partículas de metais duros nas áreas de desgaste e de ferro fundido nodular na base sendo que pode ter uma mistura de compósito e revestimento. Os materiais HX 900 é produzido sob a forma de compósito ou revestimento. O método de fundição usado nos dois casos promove uma ligação metalúrgica entre os grânulos ou partículas de metais duros nas áreas de desgaste e de ferro fundido nodular na base sendo que pode ter uma mistura de compósito conforme a figura.

Figura 9: Representação do material HX900 de tungstênio



Fonte: Site da mineradora Vale (Acesso: 08/07/2025)

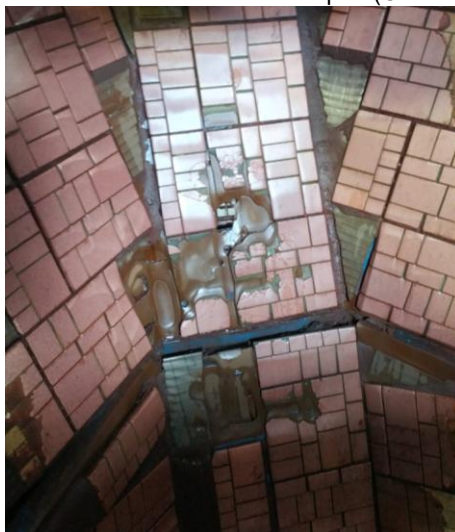
3.9. Desgaste em chutes de transferência

O desgaste em chutes de transferência são uma ação conjunta de mecanismos de impacto e abrasão, e deve ser analisado considerando os fluxos de material transportado. As aplicações para que são projetados os chutes inferem altas taxas de desgaste devido a passagem contínua e em grandes quantidades de partículas (ROBERTS, 2001). A operação dos chutes cria interfaces entre os mecanismos de desgaste abrasivo em regimes de impacto e deslizamento do material transportado, assegurados pelas forças cinéticas e gravitacionais do sistema e responsáveis pelo intenso desgaste nas superfícies dos revestimentos (ROBERTS, 2001; GATES, 2003)

O tribossistema identificado durante operação de transporte do minério-de-ferro por bancadas transportadoras, especificamente nos chutes de transferência como na (figura 10), onde é formada pela superfície interna dos chutes, logo por suas placas de revestimento com ação abrasiva do minério em movimento (SILVA, J.R., 2016).

O desgaste decorrente do fluxo de minério nas placas de revestimento dos chutes de transferência varia de acordo com a umidade e volume do material passante, a velocidade de impacto do minério e os ângulos de ataque das partículas (GATES, 2003). As propriedades mecânicas dos revestimentos alteram a eficácia do equipamento, influenciando nas trajetórias do minério, na velocidade que as partículas atingem dentro do sistema e, conseqüentemente, na ocorrência de entupimentos (CHEN, 2017).

Figura 11: Abrasão de dois e três corpos (CDP Fe-Cr-C).



Fonte: Acervo Técnico Vale (Acesso 08/07/2025)

A severidade dos mecanismos de desgaste identificados nas superfícies dos revestimentos varia também de acordo com a mineralogia e propriedades do minério transportado, fatores de forte influência nas taxas de desgaste das operações industriais e que restringem as soluções encontradas para chutes de transferência (GATES et al., 2015).

Posto isso, caracteriza-se o desgaste nas operações a seco nos chutes em:

- Contato de impacto: desgaste por abrasão-impacto quando por partículas grandes e erosão quando por partículas pequenas
- Contato de deslizamento: desgaste por LSSA (Low Stress Sliding Abrasion)

De acordo com Gates et al. (2015), ao contrário do que sugere o nome, as taxas de desgaste abrasivo por deslizamento de baixa tensão – LSSA são maiores e ocorrem com maior frequência nas atividades industriais que os de alta tensão.

Além dos desgastes advindos do minério a seco, os chutes de transferência podem sofrer também desgaste corrosivo, efeito do transporte de material úmido ou imerso em meio aquoso, que acrescenta propriedades corrosivas às interfaces minério/revestimento e influenciam nas taxas de desgaste operacionais (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

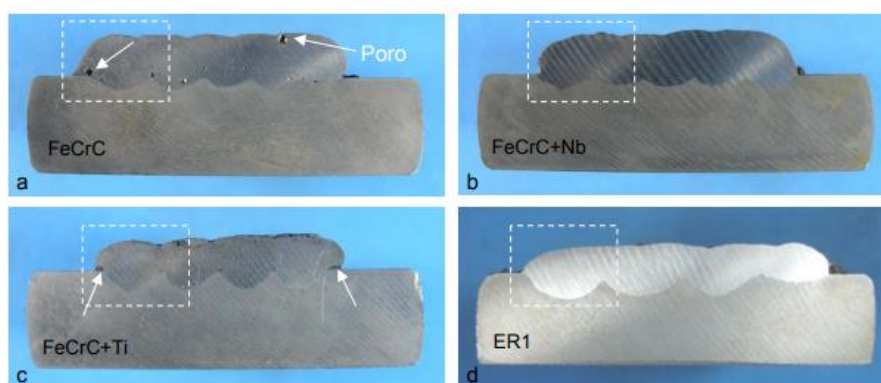
3.10. Deposição De Revestimentos Duros Por Soldagem

Revestimento duro é o processo caracterizado pela produção de uma camada dura e resistente ao desgaste, na superfície de uma peça, por meio da soldagem. O material de deposição pode ser na forma de varetas, arames ou pós, com composição química adequada, para atender as necessidades da solicitação. Durante a soldagem, o material depositado é fundido juntamente com a material base, ocorrendo, portanto, alguma diluição deste último no material de adição e produzindo a camada do revestimento como mostra a figura 12.

Considera-se um bom revestimento, quando a diluição do substrato é mínima, ou seja, apenas o suficiente para produzir a ligação metalúrgica, entre o revestimento e o substrato, mantendo assim, as propriedades de resistência ao desgaste da liga depositada (BATISTA e NASCIMENTO, 2012). Algumas das técnicas da soldagem por fusão mais utilizada na aplicação de revestimentos são pelos processos Oxiacetilênico, Eletrodo Revestido, MIG/MAG, Arco Submerso e Arames Tubulares.

Dentro destes o processo a arco elétrico com eletrodo revestido é o mais usado devido ao baixo custo dos consumíveis e à facilidade de aplicação, enquanto os arames tubulares têm sido preferidos pela alta produtividade aliada à alta qualidade de solda (BUCHELY et al 2005).

Figura 12: Representação de chapas revestida por Soldagem (CDP Fe-Cr-C).



Fonte: repositorio.ufu.pdf (Acesso 08/07/2025)

Na deposição de revestimentos, o consumível é quase sempre de composição diferente do metal de base e os elementos de liga presentes são balanceados para garantir o efeito desejado. O aço ao carbono é normalmente utilizado como metal de base, cujo elemento em abundância é o ferro. Se houver diluição elevada do metal de base serão prejudicadas as características do revestimento (COLAÇO, 2013).

Segundo AWS (1998), as variáveis fundamentais que afetam a diluição das soldas de revestimento como as:

Corrente: Aumentando a corrente de soldagem (densidade de corrente) aumenta a diluição. O arco se torna mais quente, penetrando mais profundamente fundindo mais metal de base.

Extensão do Eletrodo: Uma longa extensão de eletrodo diminui a diluição (para processo com eletrodos consumíveis) pelo aumento na taxa de fusão do eletrodo ($I^2 R$), diminuindo assim a corrente para uma fonte de tensão constante. Contrariamente, uma pequena extensão do eletrodo tende a aumentar os níveis de diluição.

Espaçamento entre Cordões: O pequeno espaçamento entre cordões (maior sobreposição) reduz a diluição porque uma maior quantidade do cordão de solda previamente depositado é refundida e misturada na poça de soldagem, ao mesmo tempo em que uma menor quantidade de metal de base é fundida e incorporada à solda. O maior espaçamento entre cordões (menor sobreposição) aumenta a diluição.

As placas de revestimento revestidas por soldagem ainda encontram uso em determinados chutes devido à sua resistência ao desgaste abrasivo. No entanto devido ao material considerado bruto e acabam gerando um desgaste mais excessivo e direto, que é considerado fora do padrão de produção, as ligas usadas para revestimento duro por soldagem podem ser classificadas de várias formas, e as principais são a composição química e a microestrutura. Segundo Wainer, Brandi e De Mello (1992), não existe uma classificação que envolva a maioria das ligas utilizadas para revestimento duro (a maioria destas são designadas pelos fabricantes), embora, existem algumas classificações baseadas na composição química do metal de adição depositado. (WAINER, BRANDI E DE MELLO, 1992).

No entanto alguns autores como Berns e Fisher (1987), Scandella e Scandella (2004), Burchelly et al (2005), Corrêa et al (2007), Lima (2008), García (2011) e Colaço e Maranhão (2014) comparam a resistência ao desgaste de revestimentos com ligas FeCrC puras e com adição de elementos metálicos formadores de carbonetos tais como o Ti, Nb, V e W. A adição destes elementos nas ligas de alto teor de cromo melhora as propriedades de resistência ao desgaste devido à inserção na matriz de novos carbonetos do tipo MC (NbC, TiC, VC, ZrC e WC) com durezas superiores ou iguais à dureza dos carbonetos de cromo.

Segundo Scotti e Rosa (1997), durante o processo de soldagem podem aparecer trincas devido à fragilidade dos revestimentos duros. Estas não são, necessariamente, indicadores de redução na resistência ao desgaste, podendo até serem favoráveis por reduzirem as tensões internas. Por outro lado, são indesejáveis nos casos de revestimento estanques ou sob esforços dinâmicos que levem à fadiga e, conseqüentemente, ao arrancamento do revestimento

hipóteses sobre o acréscimo de partículas de WC ou revestimentos de tungstênio na superfície da HX900 (Zhang, Y. et al., 2024).

Com base no escopo definido, procedeu-se à análise crítica dos artigos selecionados, extraíndo-se dados comparativos de dureza, coeficiente de atrito e taxas de desgaste em ambientes de alta abrasão (WANG; YE, 2018). Paralelamente, realizou-se uma tabulação das características físico-químicas da HX900 (microestrutura metálica, composição química e camada de endurecimento superficial) para entender seu comportamento frente ao desgaste. Esta fase também incluiu a aplicação de ferramentas para identificar as faixas de composição e tratamentos térmicos mais promissores para incorporação de tungstênio como mostra a tabela 02 (Wang, 2018)

Tabela 02: Comparação de diferentes modelos e fabricantes de placas de chute\desgaste.

Fabricante / Linha	Dureza / Propriedades Principais	Características
Sandvik HX900	900–1600 HV30 revestimento + base nodular (280–320 HB)	Altíssima dureza e resistência ao desgaste e impacto, até 20× vida útil vs 500 HB
Hyster	~700 BHN (~63 HRC)	Alta dureza, boa tenacidade, 5–6× vida útil vs AR-500
Eutectic Castolin – CDP® 4668	60–65 HRC (~650 HRC)	Microestrutura avançada, +50% vida útil
Rec-Impact	≥63 HRC, média ~700 HB	Alta resistência ao impacto, 4–5× vida útil vs 500 HB

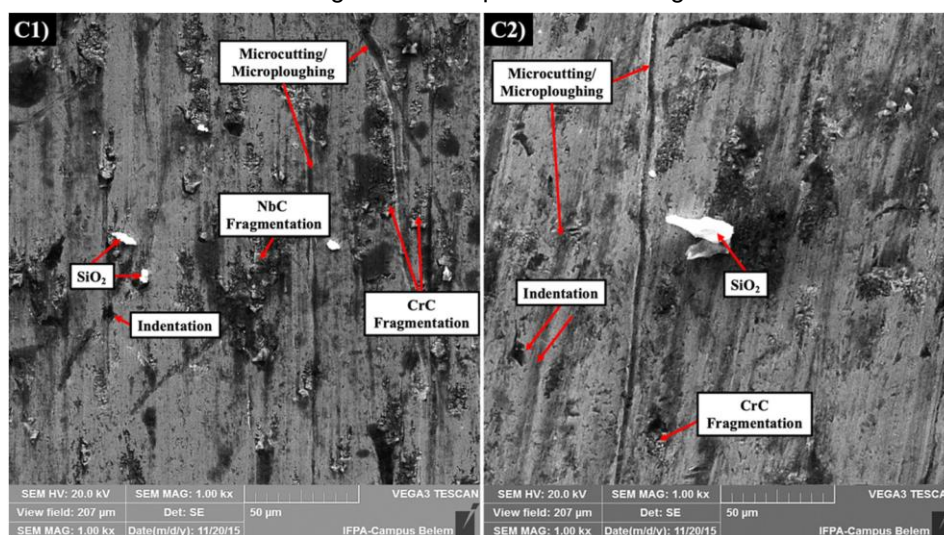
Fonte: HUNAN, 225; CASTOLIN, 2025; RECSOL, 2025; SANDVIK, 2025

Com base nos comparativos pode-se notar que a chapa HX900 apresenta características excepcionais, com dureza de 900-1600 HV30 e revestimento + base nodular (280-320 HB), oferecendo altíssima dureza e resistência ao desgaste e impacto, alcançando até 20 vezes mais vida útil comparado ao aço 500 HB. Em comparação com outros materiais, o Sandvik HX900 apresenta superioridade em termos de dureza e resistência ao desgaste e impacto.

Do ponto de vista microestrutural, os revestimentos duros aplicados sobre placas de desgaste são geralmente compostos por uma matriz metálica endurecida contendo carbonetos primários e eutéticos, sendo os carbonetos do tipo M7C3 (ricos em Cr) os mais relevantes. Esses carbonetos atuam como barreiras contra a ação das partículas abrasivas, aumentando significativamente a dureza superficial e a resistência ao desgaste (Correa et al., 2015). A Figura 11 mostra as superfícies de desgaste capturadas por MEV, para os dois revestimentos, com ampliação de 1000x.

Observando a superfície C1, é possível inferir que arranhões mais superficiais, irregulares e distribuídos aleatoriamente foram formados em comparação com a superfície C2 (SSAB, 2024).

Figura 14 – Superfícies de desgaste



Fonte: Sousa *et al.*, (2023)

No entanto já o Hyster apresenta dureza de aproximadamente 700 BHN (~63 HRC), alta dureza e boa tenacidade, mas sua performance é inferior, proporcionando 5-6 vezes mais vida útil comparado ao AR-500. O Eutectic Castolin – CDP 4668 possui dureza de 60-65 HRC (~650 HRC) e microestrutura avançada, o que lhe confere mais de 50% de aumento na vida útil. Já o Rec-Impact demonstra alta resistência ao impacto, com dureza ≥ 63 HRC e média de ~700 HB, alcançando 4-5 vezes mais vida útil comparado ao aço 500 HB (SSAB, 2024).

A análise comparativa dos materiais demonstra que o Sandvik HX900 se destaca como a melhor opção para aplicações de revestimento em mineração devido à sua excepcional dureza e resistência ao desgaste e impacto. A combinação de revestimento + base nodular do HX900 contribui para sua performance excepcional, tornando-o uma escolha preferencial para aplicações com elevado ciclo de carga e abrasão (Wang, Y.; Ye, F., 2018).

Na etapa de verificação, compararam-se os índices de desgaste e de dureza como apresentado na tabela 02, reportando para HX900 pura e para sistemas de revestimento à base de tungstênio. Critérios de avaliação incluíram: aumento A literatura técnica disponível menciona durezas absolutas (como HV30 entre 900–1600 para a porção de carbetto e HB 280–320 para o ferro nodular), redução na taxa de

desgaste ($\Delta\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) e viabilidade de aplicação em usinas (custo e facilidade de reposição). Confrontou-se ainda a bibliografia sobre falhas de revestimentos em usinas de mineração (Govande et al., 2023) comemorando-se impactos reais na manutenção dos equipamentos. Essa análise permitiu validar quais proporções de WC e métodos de deposição (HVOF, plasma) apresentavam melhor performance sobre HX900 (Yap, C. Y.; Liew, K. W.; Wang, Z., 2020).

Além disso, a maior vida útil do HX900 reduz drasticamente o número de intervenções em locais de difícil acesso e confinados, diminuindo custos indiretos (paradas de produção, horas homem em risco). A previsibilidade de cronogramas de manutenção passa a se basear no desempenho real das placas, ampliando a disponibilidade física dos equipamentos (SSAB, 2024).

Finalmente, com base nas evidências bibliográficas, propõe-se a padronização de um procedimento de aplicação de revestimento de tungstênio sobre HX900, especificando: Com base nas evidências bibliográficas, propõe-se a padronização de um procedimento de aplicação de revestimento de tungstênio sobre HX900, especificando (Yap, C. Y.; Liew, K. W.; Wang, Z., 2020).

- Pré-tratamento mecânico e térmico da chapa;
- Método de deposição (recomendação de plasma-spray para melhor aderência);
- Composição ideal de WC (40-50% em massa) para equilíbrio entre dureza e tenacidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em conjunto com Engenharia de Manutenção, foi decidido fazer um teste em local onde as condições de trabalho são mais severas para avaliar a performance delas, dessa forma foram retiradas 15 chapas de posições que não tinham nenhum contato com o minério.

Foi fabricado uma rampa de entrega de minério na correia a ser aplicada no chute de alimentação da TR-2011KS-07. A instalação ocorreu em 23/02/21 numa posição onde o impacto é de 8 metros de altura e 100% do minério passa pela mesma gerando também desgaste por abrasão.

Este material foi instalado no projeto do S11D localizada na cidade de Canaã dos Carajás-PÁ, foi diretamente testado em locais críticos (linha singela).

A instalação da chapa HX900 trouxe benefícios relacionados a inexistência de acúmulo de minério até 120 dias de operação onde sua superfície lisa facilitava o escoamento de minério. Contribuindo para a queda centralizada de minério na correia e conseqüentemente para a redução do número/tempo de desalinhamentos da TR-2011KS-07.

Redução das manutenções preventivas no chute devido o tempo de vida útil. Anteriormente as manutenções aconteciam de forma bimensal e atualmente irão acontecer de 04 em 04 meses. No período de operação entre instalação e fim de vida útil, foram transportadas 17.581.000 toneladas de minério, gerando dessa forma um perfil de desgaste de 1 mm para cada 1.172.066 t = (0.0000009 mm/t).

Figura 16: Representação do material HX900 de tungstênio



Fonte: Acervo Técnico Vale (Acesso: 08/07/2025)

Os resultados de campo com o uso de placas HX900 em usinas de mineração revelam ganhos expressivos de durabilidade em comparação a materiais convencionais. Na unidade da AngloGold Ashanti (GO), após 395 dias de operação, as placas HX900 perderam apenas 3 mm de espessura, apresentando erosão mínima nas bordas — desempenho 26 vezes superior ao do aço endurecido 400 HB (Sandvick, 2020). Além disso, ao prolongar o monitoramento até janeiro de 2021, constatou-se vida útil de 510 dias, ultrapassando em 28% as previsões iniciais.

Em comparação com outros materiais, o Sandvik HX900 apresenta características excepcionais. Com dureza de 900-1600 HV30 e revestimento + base nodular (280-320 HB), oferece altíssima dureza e resistência ao desgaste e impacto, alcançando até 20 vezes mais vida útil comparado ao aço 500 HB. Em contraste, o Hyster apresenta dureza de aproximadamente 700 BHN (~63 HRC), alta dureza e boa tenacidade, mas sua performance é inferior, proporcionando 5-6 vezes mais vida útil comparado ao AR-500.

Em outro estudo de campo, no Brasil, a substituição de chapas Hardox 400 por HX900 em um chute de transferência de minério de ouro resultou em aumento de vida útil de duas semanas (108 000 t) para 75 semanas (3,8 Mt) de produção — um incremento de 38 vezes (GLEESON, 2024). Similarmente, em operação simulada na Suécia, o HX900 elevou a durabilidade de 2 para 32 semanas (600 000 t para 9 Mt), consolidando o material como alternativa preferencial para aplicações com elevado ciclo de carga e abrasão (DIMPHO MADIBA, 2024).

De acordo com estudos de microestrutura, a combinação de tungstênio e ferro nodular no HX900 proporciona uma resistência superior ao desgaste abrasivo e corrosivo, tornando-o uma escolha ideal para aplicações em mineração (Wang; Ye, 2017). Além disso, a microdureza das interações tungstênio-ferro em HX900 alinha-se à de revestimentos WC-Co convencionais, que atingem durezas da ordem de 1300-1378 HV_{0.3}, essencial para resistência ao desgaste abrasivo e corrosivo de alto impacto (Shu et al., 2022).

O Eutectic Castolin – CDP 4668 possui dureza de 60-65 HRC (~650 HRC) e microestrutura avançada, o que lhe confere mais de 50% de aumento na vida útil. Embora seja uma opção viável, sua performance é inferior à do HX900. Já o Rec-Impact demonstra alta resistência ao impacto, com dureza ≥ 63 HRC e média de ~700 HB, alcançando 4-5 vezes mais vida útil comparado ao aço 500 HB.

A análise comparativa dos materiais demonstra que o Sandvik HX900 se destaca como a melhor opção para aplicações de revestimento em mineração devido à sua excepcional dureza e resistência ao desgaste e impacto. A combinação de revestimento + base nodular do HX900 contribui para sua performance excepcional, tornando-o uma escolha preferencial para aplicações com elevado ciclo de carga e abrasão.

A adesão e integridade do revestimento são cruciais para ambientes de mineração. Coatings WC-base preparados no HVOF exibem força de adesão entre 72 e 82 MPa, superando muitas outras técnicas de deposição (plasma, cold spray) e garantindo durabilidade sob ciclos de carga intermitente. Este nível de coesão é comparável à obtenção de dispersão uniforme dos grânulos de tungstênio dentro do ferro nodular em HX900 (Son *et al.*, 2025).

Além disso, a maior vida útil do HX900 reduz drasticamente o número de intervenções em locais de difícil acesso e confinados, diminuindo custos indiretos (paradas de produção, horas homem em risco). A previsibilidade de cronogramas de manutenção passa a se basear no desempenho real das placas, ampliando a disponibilidade física dos equipamentos.

Do ponto de vista ambiental, o HX900 representa avanço ao utilizar 99% de ferro nodular reciclado e 100% de carbetos de tungstênio reaproveitados, o que reduz em até 70% o consumo energético e chega a 40% menos emissões de CO₂ em comparação a ligas produzidas com materiais virgens. A circularidade nesta cadeia reforça a sustentabilidade das operações de mineração (Long, 2024).

Em resumo, o Sandvik HX900 é a opção mais adequada para aplicações de revestimento em mineração devido à sua excepcional dureza, resistência ao desgaste e impacto, e vida útil prolongada. Sua performance superior em comparação a outros materiais, como Hyster, Eutectic Castolin – CDP 4668 e Rec-Impact, o torna uma escolha preferencial para aplicações com elevado ciclo de carga e abrasão.

A literatura indica que a aplicação de WC entre 40% e 50% em massa, depositados via plasma-spray ou HVOF, otimiza o balanço entre resistência ao desgaste e tenacidade do revestimento. Para a HX900, recomenda-se explorar tratamentos térmicos pós-fundição que promovam zoneamento democrático do tungstênio no ferro, a fim de replicar a microestrutura multicamada dos coatings WC-Co, aumentando ainda mais a vida útil (Wang; Ye, 2017).

Figura 17: Representação da microestrutura do material



Fonte: Acervo Técnico Vale (Acesso: 08/07/2025)

Apesar dos resultados promissores, a análise ainda carece de validação laboratorial direta em condições controladas de abrasão/impacto simulando diferentes minérios (granulometria, dureza). Estudos futuros devem implementar ensaios padrão (ASTM G65, G133) em amostras de HX900 tratadas termicamente e com revestimento adicional de WC, complementando os resultados com dados experimentais que consolidem a proposta de melhoria contínua.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de revestimentos baseados em tungstênio (HX900) em chutes de transferência de minério demonstrou ser uma solução altamente eficaz para aumentar a vida útil e reduzir as paradas de manutenção. A combinação de dureza elevada e tenacidade proporcionada pelo compósito tungstênio-ferro nodular otimiza o comportamento tribológico sob regimes de abrasão e erosão, superando materiais tradicionais como aços AR, cerâmicas e revestimentos metálicos convencionais.

Além dos benefícios mencionados, o uso de revestimentos HX900 também proporciona:

- Redução de custos operacionais: devido à menor necessidade de paradas de manutenção e substituição de peças.
- Aumento da produtividade: graças à maior disponibilidade do equipamento e menor tempo de inatividade.
- Melhoria da segurança: redução do risco de acidentes e lesões relacionados à manutenção e reparo de equipamentos.
- Flexibilidade de aplicação: possibilidade de aplicação em diferentes tipos de equipamentos e superfícies.

A utilização de revestimentos HX900 em chutes de transferência de minério é uma solução técnica e viável para a indústria mineral, oferecendo benefícios significativos em termos de desempenho, confiabilidade e produtividade.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O processo de manutenção é mantido pela mentalidade de melhoria contínua, que visa buscar melhorias constantemente seja no mercado ou nas melhorias dos trabalhos realizados, partindo disso para trabalho futuro obtém as seguintes sugestões:

1. Análise comparativa de desempenho de revestimentos HX900 em diferentes tipos de equipamentos: avaliar o desempenho do revestimento HX900 em diferentes aplicações, como chutes de transferência e britadores etc.
2. Desenvolvimento de novos materiais compósitos baseados em tungstênio: investigar a possibilidade de criar materiais compósitos que combinem as propriedades do tungstênio com outros elementos para melhorar ainda mais o desempenho em ambientes abrasivos e erosivos.
3. Estudo da influência da microestrutura do revestimento HX900 no seu desempenho tribológico: analisar como a microestrutura do revestimento afeta sua resistência à abrasão e erosão, e como isso pode ser otimizado.
4. Avaliação do impacto ambiental da produção e aplicação de revestimentos HX900: realizar uma análise do ciclo de vida dos revestimentos HX900 para entender melhor seu impacto ambiental e identificar oportunidades para melhoria.
5. Desenvolvimento de modelos preditivos para estimar a vida útil de revestimentos HX900: criar modelos matemáticos que possam prever a vida útil dos revestimentos HX900 com base em parâmetros como carga, velocidade, tipo de material transportado etc.
6. Análise da viabilidade econômica da aplicação de revestimentos HX900 em diferentes setores industriais: avaliar a relação custo-benefício da aplicação de revestimentos HX900 em diferentes setores, como mineração, petróleo e gás, construção civil etc.
7. Estudo da influência da manutenção e reparo nos revestimentos HX900: investigar como as práticas de manutenção e reparo afetam a vida útil e o desempenho dos revestimentos HX900.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023:2018 – Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2018.

CAMPOS, P. Relatório de avaliação de desgaste – Instituto Tecnológico Vale, 2023. (Documento interno).

CASTOLIN Eutectic. *CastoDur® Diamond Plate (CDP®) – technical data sheet: welded overlay wear plate, microstructure avançado, “XuperWave-S” pattern*. (PDF técnico).

CHEN, Q.; BISWAS, A.; ROBERTS, D.; O’HEA, D.; WILLIAMS, J. Wear mechanisms in high-stress transfer chute environments. *Wear*, v. 382-383, p. 21–30, 2017.

CORONADO, John J.; CAICEDO, Holman F.; GÓMEZ, Adolfo L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology international*, v. 42, n. 5, p. 745-749, 2009.

CORREA, EO et al. Efeito da microestrutura no desgaste abrasivo de uma liga de revestimento duro Fe-Cr-C-Nb depositada pelo processo de soldagem a arco aberto. *Surface and Coatings Technology*, v. 276, p. 479-484, 2015.

CRUZ-CRESPO, Amado et al. Microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloys deposited by S-FCAW and cold solid wires. *Soldagem & Inspeção*, v. 21, n. 3, p. 342-353, 2016.

DIN 50320:1979. *Tribologie – Verschleißarten – Begriffe und Klassifikation*. Berlin: Beuth, 1979.

DOWSON, D. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Oxford: Pergamon Press, 1979.

FISHER, G.; DIAZ, D. The design and selection of tungsten carbide-based composite overlays for aggressive wear service conditions. *Advances in Applied Ceramics*, v. 122, n. 3-4, p. 170–180, 2023. doi:10.1080/17436753.2023.2236888

GAHR, K.-H. Abrasive wear mechanisms. *Tribology International*, v. 31, n. 7, p. 395–401, 1998.

GAHR, K.-H. *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam: North Holland, 1987.

GATES, S. *Abrasion and erosion in bulk solids handling*. London: Taylor & Francis, 2015.

GATES, S. et al. Abrasive-erosive wear in mineral handling chutes. *Wear*, v. 334-335, p. 44–52, 2015.

GOVANDE, A. R.; RATNA SUNIL, B.; DUMPALA, R. Wear and corrosion behaviour of the cryogenically treated tungsten carbide coatings. *Surface Engineering*, v. 39, n. 3, p. 326–338, 2023. doi:10.1080/02670844.2023.2218204

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. O manual de deslizamento—Um guia para a compreensão de deslizamentos. Reston, Virginia, US Geological Survey Circular, v. 1325, 2008.

HOCKE, R. W. Wear-resistant materials for chutes and hoppers. *Wear*, v. 22, p. 351–360, 1973.

HOLMBERG, K. *Advances in tribology for sustainable manufacturing*. New York: Springer, 2017.

HUNAN Hyster Material Technology Co., Ltd. *White Iron Wear Parts: technical data – Hardness: 63HRC / 700 BHN; Shearing strength: 250 MPa; Tensile strength: ≥ 630 MPa; Chemical composition ASTM A532 15/3CrMo*.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*, 2. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2017.

ILIC, D. Design criteria for transfer chutes. *Journal of Bulk Solids Handling*, v. 39, n. 2, p. 112–121, 2019.

KSIAZEK, M.; NEJMAN, I.; BORON, L. Investigation on microstructure, mechanical and wear properties of HVOF sprayed composite coatings (WC–Co + Cr) on ductile cast iron. *Materials*, v. 14, art. 3282, 2021. doi:10.3390/ma14123282

LI, XC et al. Investigação sobre a relação entre microestrutura e características de desgaste de materiais ferroviários. *Tribology International*, v. 163, p. 107152, 2021.

LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antonio; REIS, Ruham Pablo. Performance analysis of weld hardfacings used in the sugar/alcohol industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, n. 5, p. 1823-1833, 2014.

LONG, K. Protection plate wear resistance revolution in Africa. *African Mining Online*, 28 out. 2024. Disponível em: <https://www.africanmining.co.za/2024/10/28/protection-plate-wear-resistance-revolution-in-africa/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

MACHADO, Kevin Willer do Rosário. Avaliação do custo do desgaste em britador, moinho, peneira e chute na indústria da mineração. 2024. 73 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

MADIBA, D. Wear resistance revolution as Sandvik launches unique HX900 in Africa. *Mining Weekly*, 18 out. 2024. Disponível em: <https://www.miningweekly.com/article/wear-resistance-revolution-as-sandvik-launches-unique-hx900-in-africa-2024-10-18>. Acesso em: 24 jul. 2025.

PETERSON, M. *Introduction to tribology of bearings*. New York: Wiley, 1980.

RECSOL S.A. *REC-IMPACT – Placas de desgaste bimetálicas (metal branco Cr-Mo sobre aço macio), dureza média aproximadamente 700 HBN (mín. 63 HRC); durabilidade 4–5× em comparação ao aço 500 HB.*

REDAÇÃO ITM. Resistência e durabilidade. Revista In The Mine, 2017. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/resistencia-e-durabilidade/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

ROBERTS, A. Bulk material handling equipment: design and operation. London: Chapman & Hall, 2001.

SHU, W. et al. Microstructure and wear resistance of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating on Ti-6Al-4V. Heat Treatment and Surface Engineering, v. 4, n. 1, p. 70–75, 2022. doi:10.1080/25787616.2022.2148352

SILVA, J. R. Estudo do comportamento tribológico em chutes de transferência de minério de ferro. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

SINATORA, S. Wear in mineral processing plant equipment. Minerals Engineering, v. 18, n. 1, p. 49–54, 2005.

SON, Y.-H. et al. Comparison of durability and gamma-ray shielding performance of high-velocity oxygen fuel tungsten carbide-based coatings on cold-rolled steel surface. Crystals, v. 15, art. 21, 2025. doi:10.3390/cryst15010021

SOUSA, J. M. S. et al. Tribological performance under abrasive wear of Fe-Cr-C+ Nb coating deposited by FCAW process. Wear, v. 523, p. 204824, 2023.

SSAB. HX900 high-strength structural steel – Product datasheet. SSAB, 2024. Disponível em: <https://www.ssab.com/products/hx900>. Acesso em: 10 jun. 2024.

WANG, T.; YE, F. The elevated-temperature wear behavior evolution of HVOF sprayed tungsten carbide coatings: respond to heat treatment. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 71, p. 92–100, 2018.

YAP, C. Y.; LIEW, P. J.; WANG, J. Surface modification of tungsten carbide cobalt by electrical discharge coating with quarry dust powder: an optimisation study. Materials Research Express, v. 7, n. 10, p. 106407, 2020. doi:10.1088/2053-1591/ab9e2c

ZHAO, L. et al. Optimizing wear resistance and tensile strength of nickel-based coatings through tungsten carbide reinforcement. Metals, v. 14, art. 1097, 2024. doi:10.3390/met14101097

DE CANA-DE-AÇÚCAR, Estudo D. A. Aplicação D. E. Revestimento Duro Por Soldagem Com Arames Tubulares Quanto À Resistência A O. Desgaste D. E. Facas Picadoras. ALDEMI COELHO LIMA. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14675/1/Aldemi%20-%20parte%201.pdf>>. Acesso em: 7 Julho. 2025.

WANG, Y.; YE, F. Microstructure and properties of tungsten carbide coatings deposited by HVOF. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 26, n. 4, p. 741–753, 2017.

SHU, D. Microstructure and wear resistance of WC-Co coatings deposited by HVOF. *Surface and Coatings Technology*, v. 428, 2022.

LONG, J. Sustainability benefits of using recycled materials in mining applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 379, 2024.

POLIDO, R. S. e GALLEGOS, J. Estudo da Microestrutura de Revestimento Duro Aplicado nos Equipamentos da Indústria Sucroalcooleira Sujeito ao Desgaste Abrasivo. Disponível em: http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/publica/publicado_2006/saito_cicun_Esp_2006.pdf. Acesso em: 16 setembro de 2025.

POSCH, G.; VALLANT, R.; KLAGGES, W.; CERJAK, H. Influence of Niobium on Mechanical Properties and Hot Crack Susceptibility of Nickel-base Cored-wire Metal Type 70/20 and 70/15. In: TANTALUM-NIOBIUM INTERNATIONAL STUDY CENTER GENERAL ASSEMBLY, 47, 2006, Áustria

LIMA, L. I. L.; SILVA, G. M.; CHILQUE, A.R.A. Caracterização Microestrutural de Soldas Dissimilares dos Aços ASTM A-508 E AISI 316L. *Inspeção de Soldagem*, São Paulo, Vol. 15, nº 2. p. 112-120. Abr./Jun. 2010.

PALANI, P. K. e MURUGAN, N. Sensitivity analysis for process parameters in cladding of stainless steel by flux cored arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 8, n. 2, p. 90- 100, 2006.

FISHER, J.; DIAZ, V. Wear resistance of tungsten carbide coatings in mining applications. *Journal of Mining Science*, v. 59, n. 3, p. 531–543, 2023.

ZHANG, Y. Continuous improvement methodologies in manufacturing and mining. *International Journal of Production Research*, v. 62, n. 1, p. 238–253, 2024.

WANG, Y.; YE, F. Microstructure and properties of tungsten carbide coatings deposited by HVOF. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 27, n. 4, p. 741–753, 2018.

YAP, C. Y.; LIEW, K. W.; WANG, Z. Optimization of tungsten carbide coating parameters for improved wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, v. 385, 2020.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ANEXO III

FICHA DE AVALIAÇÃO DE TCC

Discente: Heliardo Corrêa Demetrio (202034040043)

Título: Estudo sobre as diferentes ligas utilizadas em revestimentos metálicos das placas de chute na usina de Carajás-Pará

Orientador (a): Prof. Dr. Douglas Neves Garcia

Formatação, organização, redação: (Cada item 0,5 pontos - Total máximo 2,0 pontos)	1º Aval.	2º Aval.	3º Aval.
a) Os critérios básicos de formatação foram seguidos?	0,5	0,5	0,5
b) A redação é clara e organizada, inclusive as citações?	0,5	0,5	0,5
c) As referências são adequadas e atuais?	0,5	0,5	0,5
d) Organização	0,5	0,5	0,5
Conteúdo: (Cada item 1,0 ponto – Total máximo 5,0 pontos)			
a) A Introdução apresenta claramente os elementos básicos?	1,0	1,0	1,0
b) A Fundamentação Teórica é coerente, consistente e atual?	0,5	0,5	0,5
c) A Metodologia é apropriada? Está bem explicitada e organizada?	0,5	0,5	0,5
d) A apresentação e discussão dos dados são realizadas de forma organizada e articulada com a teoria?	1,0	1,0	1,0
e) A Conclusão é coerente com os objetivos?	1,0	1,0	1,0
Apresentação: (Cada item 1,0 ponto – Total máximo 3,0 pontos)			
a) Apresentação dos objetivos, da metodologia, dos resultados e conclusão.	1,0	1,0	1,0
b) Domínio do conteúdo e Desempenho na arguição	1,0	1,0	1,0
c) Adequação do material audiovisual e ao tempo de 20 min	1,0	1,0	1,0
TOTAL FINAL	9,0	9,0	9,0

MÉDIA FINAL: 9,0

CONCEITO FINAL: Excelente

Tucuruí-PA, 12 de setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br WASSIM RAJA EL BANNA
Data: 15/09/2025 16:29:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Prof. Dr. Wassim Raja El Banna/UFGPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDERSON SOUSA DOS SANTOS
Data: 15/09/2025 16:08:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Anderson Sousa dos Santos/VALE)

Documento assinado digitalmente
gov.br DOUGLAS NEVES GARCIA
Data: 19/09/2025 10:32:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Prof. Dr. Douglas Neves Garcia)