



WIVYAN CASTRO LAGE

**ESTUDO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE BRITADORES
QUATERNÁRIOS APLICADOS EM USINA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO
DE FERRO**

Ouro Preto, MG

2023

WIVYAN CASTRO LAGE

**ESTUDO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE BRITADORES
QUATERNÁRIOS APLICADOS EM USINA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO
DE FERRO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Atrito, Desgaste e Lubrificação.

Área de concentração: Engenharias.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Tressia

Ouro Preto, MG

2023

Título: ESTUDO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE BRITADORES QUATERNÁRIOS APLICADOS EM USINA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO.

Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)

L17e

Lage, Wivyan Castro
Estudo tribológico de revestimentos de britadores quaternários aplicados em usina de beneficiamento de minério de ferro. Wivyan Castro Lage... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.

58 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2023.
Orientador: Gustavo Tressia

1. Aço Hadfield. 2. Desgaste Abrasivo. 3. Aço Manganês Austenítico. 4. Britadores Cônicos. I. Tressia, Gustavo. II. Título.

CDD.23. ed. 621.89

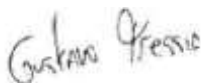
Wivyan Castro Lage

**ESTUDO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE BRITADORES
QUATERNÁRIOS APLICADOS EM USINA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO
DE FERRO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Atrito, Desgaste e Lubrificação.

Data da Aprovação: 31/10/2023

Banca Examinadora:



Gustavo Tressia de Andrade
Orientador – Doutor – Instituto Tecnológico Vale (ITV)



Eleir Mundim Bortoleto
Membro interno – Doutor – Instituto Tecnológico Vale (ITV)



Luiz Henrique Dias Alves
Membro externo – Doutor – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Dedico este trabalho à Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por me conceder saúde e disposição para estudar, à minha família por me apoiar e compreender minha ausência em função das pesquisas. Agradeço ao Claudinei Santos, ao Romulo Brandão e demais lideranças da Vale por me proporcionarem a possibilidade de cursar esta especialização. Também agradeço aos meus colegas de profissão Rodolfo Guimarães, Fabiano Mendes, Tiago Magalhães e Bismarck Oliveira, que supriram muitas das minhas demandas, uma semana por mês durante os anos de 2022 e 2023, para que eu pudesse participar das aulas e demais atividades do curso. Meus agradecimentos especiais também são dedicados ao meu orientador Gustavo Tressia, ao Eleir Bortoleto, ao Jimmy Penagos, aos estagiários, técnicos e demais pesquisadores do ITV que foram fundamentais na execução das análises, assim como na interpretação e discussão delas. Aos professores do ITV, sintam a minha eterna gratidão, por toda a paciência e dedicação, em especial ao Luiz Alves e ao Deniol Tanaka (*in memoriam*).

“Aprender é a única coisa da qual a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”.

Leonardo Da Vinci

RESUMO

No presente trabalho, foi realizado um estudo tribológico de revestimentos de côncavo e de manto, usados em britadores cônicos, aplicados no processo de britagem quaternária de uma usina de beneficiamento de minério de ferro. Inicialmente foi realizada uma análise dos dados de vida das sessões dos revestimentos aplicados, foram selecionadas amostras das peças que sofrem desgaste mais crítico para realizar o estudo tribológico. Mecanismos de desgaste e extensão de deformação foram estudados por microdureza, microscopia óptica (OM), microscopia eletrônica de varredura (MEV). O manto e o côncavo foram fabricados na mesma liga, aço manganês austenítico com 12%Mn. Ensaios de abrasão na configuração de roda de borracha foram realizados nas amostras de manto e côncavo em comparação com outras duas ligas comerciais de aço manganês com 18%Mn e com 18%Mn e 2,5%Cr. Observou-se que o desgaste do côncavo ocorre de forma diferente do manto. Enquanto o primeiro sofre mais indentação, o segundo tem um perfil mais voltado para a abrasão. Esta análise foi de suma importância para a realização da revisão da estratégia de manutenção. O manto apresentou menor encruamento e maior taxa de desgaste em relação ao côncavo. O mecanismo de desgaste predominante é a abrasão. O aço manganês austenítico com 18%Mn e 2,5%Cr apresentou alta resistência ao desgaste abrasivo, sendo a taxa de desgaste 18% menor em relação à liga utilizada na fabricação de revestimentos de britadores cônicos. Maiores valores de dureza resultam em menor taxa de desgaste, a utilização de aço manganês austenítico com 18%Mn e 2,5%Cr torna-se atraente para aumentar a vida útil dos revestimentos de britadores cônicos.

Palavras-chave: Aço Hadfield. Desgaste abrasivo. Aço Manganês austenítico. Britadores cônicos.

Fase da Cadeia: Usina.

ABSTRACT

In the present work, a tribological study was carried out on concave and mantle linings of cone crushers applied in the quaternary crushing process of an iron ore processing plant. Initially, an analysis of the life data of the applied coating sessions was carried out, samples of parts that undergo the most critical wear were selected to carry out the tribological study. Wear mechanisms and deformation extent were evaluated by microhardness, optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM). The mantle and concave were manufactured in the same alloy, an austenitic manganese steel with 12%Mn. Abrasion tests in the dry sand rubber wheel abrasion test configuration were carried out on the mantle and concave samples in comparison with two other commercial manganese steel alloys with 18%Mn and with 18%Mn and 2.5%Cr. Note that the wear of the concave occurs differently than the mantle. While the first suffers more wear generated by indentation mechanism, the second has wear profile due to abrasion. This analysis was extremely important for carrying out the review of the maintenance strategy. The mantle showed less strain hardening and a higher wear rate compared to the concave. The predominant wear mechanism is abrasion. Austenitic manganese steel with 18%Mn and 2.5%Cr showed higher resistance to abrasive wear, with a wear rate 18% lower compared to the alloy used in the manufacture of cone crusher linings. Higher hardness values result in lower wear rates, the use of austenitic manganese steel with 18%Mn and 2.5%Cr e to increase the useful life of cone crusher linings.

Keywords: Hadfield steel. Abrasive wear. Austenitic Manganese Steel. Cone crushers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de funcionamento de um britador cônico CH660.	19
Figura 2 – Mecanismos de desgaste abrasivo. A) Microsulcamento. B) Microcorte. C) Microfadiga. D) Microtrincamento.	21
Figura 3 – Composições do aço Hadfield conforme a ASTM 128.	22
Figura 4 – Imagem do revestimento do manto após 800 horas operadas.	24
Figura 5 – Imagem do revestimento do côncavo na posição de montagem após 800 horas operadas.	25
Figura 6 – Representação esquemática da posição de medições de espessura dos revestimentos de côncavo e manto. MS1 – manto superior 1; MS2 – manto superior 2; MI1 – manto inferior 1; MI2 – manto inferior 2; CS1 – côncavo superior 1; CS2 – côncavo superior 2; CI1 – côncavo inferior 1; CI2 – côncavo inferior 2.	26
Figura 7 – Imagem representativa do funcionamento de um britador cônico alimentado por fragmentos de mineral.	29
Figura 8 – Esquema representativo do modo de desgaste abrasivo à três corpos.	30
Figura 9 - Vida B20 das regiões de medição dos revestimentos.	30
Figura 10 – Representação das taxas de desgaste nas diferentes regiões do manto e do côncavo.	31
Figura 11 – Confiabilidade vs. Tempo – Manto.	32
Figura 12 - Confiabilidade vs. Tempo – Côncavo.	32
Figura 13 – Imagem de microscopia óptica da amostra do manto.	35
Figura 14 - Imagem de microscopia óptica da amostra do côncavo.	35
Figura 15 – Microestrutura das amostras observadas por MEV. A) Manto Superior. B) Manto Inferior. C) Concavo Superior. D) Concavo Inferior.	37
Figura 16 – Apresentação dos resultados referentes à macro dureza Vickers. A) Manto, B) Côncavo.	38
Figura 17 – Apresentação dos resultados de microdureza Vickers. A) Manto – posição MI2. B) Côncavo – posição CI2. C) Zoom da região destacada em A. D) Zoom da região destacada em B.	39
Figura 18 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão das amostras de côncavo e manto.	40
Figura 19 – Apresentação dos resultados de resistência ao Impacto Charpy das amostras de manto e côncavo.	41
Figura 20 – Análise fotográfica das regiões de trincas da amostra do MX.	42
Figura 21 – Análise de MEV da amostra do MX. Estrias de fadiga estão indicadas por setas amarelas.	43
Figura 22 – Metalografia óptica da amostra do MX, apresentando regiões de núcleo com defeitos.	45
Figura 23 – Metalografia da amostra MX, na região da superfície.	45
Figura 24 - Micrografia de um aço Hadfield ASTM A128 B-2 após solubilização de forma adequada com microestrutura austenítica isenta de carbonetos.	49
Figura 25 - Micrografia de um aço Hadfield ASTM A28 B-2 após solubilização de forma inadequada com microestrutura austenítica, porém com presença de carbonetos.	50
Figura 26 - Geometria dos corpos de prova para ensaio Charpy. Cotas em mm.	51

Figura 27 - Padrão SCRATA para inclusões superficiais nível 2 (esquerda) e porosidade nível 2 (direita).	52
Figura 28 - Padrão SCRATA para rugosidade superficial nível 2 (esquerda) e dobras nível 1 (direita).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Detalhamento sobre as razões de redução, tamanho máximo de alimentação e de produto nos estágios de britagem primária, secundária, terciária e quaternária.....	18
Tabela 2 – Resumo de propriedades do aço Hadfield.	22
Tabela 3 – Análise química das amostras Manto Superior (MS), Manto Inferior (MI), Concavo Superior (CS) e Côncavo Inferior (CI).....	33
Tabela 4 – Análise química do MX.....	42
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração.	46
Tabela 6 – Resultados do ensaio de impacto, à temperatura ambiente.	46
Tabela 7 - Composição química de aço Hadfield (ASTM A 128 Grau B-2).....	47
Tabela 8 – Propriedades mecânicas requeridas.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos gerais	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Processo de britagem na mineração	17
3.2	Britadores cônicos	18
3.3	Mecanismos de desgaste em revestimentos de britadores	20
3.4	Aços hadfield	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.2.1	Análise de dados de vida	25
4.2.2	Análise química	26
4.2.4	Microscopia eletrônica de varredura	27
4.3	Análise de falha	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1	O Tribossistema	29
5.2	Análise de taxa de degradação	30
5.3	Caracterização dos materiais do côncavo e manto.	33
5.3.1	Análise química	33
5.3.2	Estereoscopia das amostras de manto e côncavo	33
5.3.3	Macro dureza e Micro dureza Vickers	37
5.3.4	Resistência à abrasão	39
5.3.5	Resistência ao impacto	40
5.4	Análise de falha	41
5.4.2	Análise visual e MEV	42
5.4.3	Análise de micrografia óptica	43
5.5	Especificação técnica	47
5.5.1	Composição química	47
5.5.2	Tratamento térmico	48
5.5.3	Propriedades Mecânicas	50

5.5.4 Sanidade e observações gerais.....	51
5.5.5 Data Book (Certificado De Qualidade)	53
6 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Em usinas de beneficiamento de minério de ferro são utilizados britadores para a cominuição até uma faixa específica para a etapa seguinte do processo, a moagem. É muito comum a utilização de britadores cônicos, onde a britagem ocorre dentro de uma cavidade chamada câmara, cujo capacidade é definida pela distância entre o côncavo e o manto, chamada de APF – Abertura da Posição Fechada. (MEIRELES, 2020). Os revestimentos do côncavo e manto sofrem desgaste e necessitam ser trocados com determinada periodicidade.

Verifica-se que o desgaste está intrinsecamente relacionado ao custo nas empresas, uma vez que os componentes desgastados precisam ser substituídos por novos. As estimativas do prejuízo provocado pelo desgaste, por si só, já justificam os investimentos sobre tecnologias antidesgaste. Um estudo realizado por Parucker (2008) mostra que problemas relacionados ao desgaste e corrosão de componentes de máquinas representam perdas de 2 a 5% no PIB mundial. Nesse sentido há necessidade de entender os mecanismos tribológicos e de desenvolvimento de materiais focando na minimização de perdas por desgaste (OLIVEIRA, 2015).

Tribologia é uma palavra de origem grega, que deriva do radical “tribos” que significa “roçar-esfregar”, foi usada pela primeira vez em 1966 por H. Peter Jost. A tribologia reúne conhecimentos de física, química, mecânica, metalúrgica e ciências dos materiais para descrever e explicar os fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação. Assim como as ciências que compõe a tribologia já existiam antes dela, data-se que Leonardo da Vinci formalizou o conceito de tribologia muito antes de 1966 (SINATORA, 2005).

A proposta apresentada neste trabalho é entender e descrever os mecanismos de desgaste sofridos pelos revestimentos de côncavo e manto, de um britador instalado no quarto estágio de britagem de uma usina de beneficiamento de minério de ferro e a partir desses resultados, propor melhorias objetivando-se estender o tempo entre paradas do equipamento para troca desses revestimentos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Desenvolver uma metodologia para a avaliação tribológica de revestimentos de britadores cônicos, possibilitando identificação de mecanismos de desgaste, de alterações microestruturais e taxa de desgaste dos componentes. Almeja-se propor alternativas para a produção de revestimentos de britadores visando o incremento de vida útil destes componentes.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar análise da degradação de revestimentos de côncavo e manto para traçar uma curva de análise de dados de vida;
- Obter amostras de revestimentos em fim de vida útil de britadores operando no circuito de britagem quaternária;
- Apresentar o tribossistema envolvido na aplicação;
- Escrever uma metodologia para avaliação da degradação de revestimentos de côncavo e manto;
- Caracterizar físico-quimicamente as amostras: Estereoscopia, microscopia eletrônica de varredura, micro e macro dureza Vickers, análise de composição química, ensaio de resistência à abrasão e de resistência ao impacto;
- Discutir os resultados obtidos na caracterização, traçando o perfil tribológico envolvido;
- Avaliar ligas alternativas em laboratório e comparar com a aplicada atualmente;
- Propor uma especificação técnica de material para compra de revestimento de britadores cônicos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Processo de britagem na mineração

Acredita-se que o início da fragmentação dos materiais iniciou-se com tribos selvagens usando pedras arredondadas em uma das mãos e uma pedra maior com uma cavidade, onde era depositado o material a ser fragmentado. A partir da necessidade de atender determinadas especificações do produto cominuído, algumas técnicas foram evoluindo a fim de aperfeiçoar o método (SAMPAIO & JUNIOR, 2018).

Sampaio & Junior (2018) ainda relatam que a cominuição é o processo responsável pelo maior consumo de energia em um processo de mineração. Portanto deve-se considerar fatores como aumento crescente do custo energético, redução dos preços dos produtos resultantes da mineração, jazidas com minérios cada vez mais complexos e teores menores do que os de interesse, além de exigências ambientais cada vez mais rígidas. Mesmo com os avanços das técnicas, a cominuição ainda é pouco eficiente, o que se dá por exemplo pelo grande consumo de energia envolvido nos processos de fricção (HOLMBERG, 2017). Nas usinas de beneficiamento de minério de ferro, por exemplo, a cominuição é representada pelos processos de britagem e moagem.

A britagem é um conjunto de operações unitárias com o objetivo de fragmentar blocos de minério vindos da mina, levando-os à granulometria compatível para a utilização no processo subsequente. Utiliza de sucessivas etapas e equipamentos apropriados para a redução para tamanhos convenientes. Normalmente para haver um desprendimento satisfatório do metal explorado é necessário a redução para uma granulometria fina, dessa forma é usual a utilização de britadores nos primeiros estágios e de moinhos nos últimos (MULAR e BHAPPU, 1980; PRYOR, 1965).

Na britagem primária utiliza-se britadores de grande porte, os mais utilizados são os britadores de mandíbulas, giratório, impacto e rolo dentado. Normalmente o processamento é feito em circuito aberto, a seco e tem uma relação de redução de 8:1. Os britadores giratórios são preferencialmente usados quando existe uma grande quantidade de material a ser fragmentado, podendo ser alimentado por qualquer lado (OBLAD et al., 1980; SPOTTISWOOD, 1982). A britagem secundária é o processo subsequente à primária, nesta etapa já se começa a aplicar peneiras com o objetivo de retirar do processo seguinte os materiais finos (SAMPAIO & JUNIOR, 2018).

As britagens terciária e quaternária são os últimos estágios de britagem. São mais usuais os processos que terminam na britagem terciária, mas dependendo do tipo de minério processado e da granulometria desejada, pode-se necessitar de mais um estágio de britagem, a quaternária, neste caso a granulometria obtida já é a do produto. Os equipamentos usados usualmente são britadores cônicos cuja granulometria máxima do produto obtido está compreendida na faixa de 25 a 3 mm, com uma razão de redução de 4:1 ou 6:1. Estes equipamentos exigem um maior controle de operação, geralmente operando em circuito fechado (SAMPAIO & JUNIOR, 2018).

3.2 Britadores cônicos

Os britadores cônicos são muito usados em indústrias de agregados e mineradoras. Diversos autores apontam que a eficiência de cominuição desses britadores varia entre 6 e 80%, são usados em britagens secundárias, terciárias e quaternárias, Tabela 1, basicamente seus modelos diferenciam-se pela relação da altura do cone e o diâmetro de sua base, a qual define o ângulo e a inclinação do manto (SILVEIRA, 2009; MOREIRA & EUZÉBIO, 2019).

Tabela 1 – Detalhamento sobre as razões de redução, tamanho máximo de alimentação e de produto nos estágios de britagem primária, secundária, terciária e quaternária.

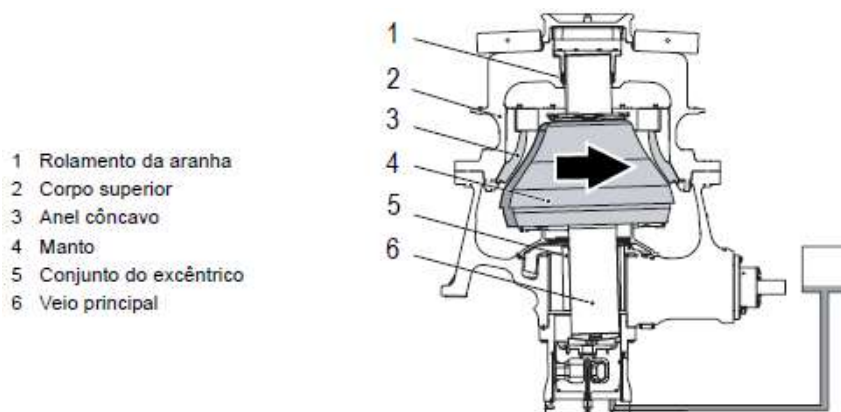
Estágio de Britagem	Razão de Redução	Tamanho máximo (mm)	
		Alimentação	Produto
Primária	8:1	1524 a 3200,4	> 304,8 a 101,6
Secundária	6 a 8:1	635 (cônicos)	101,6 a 19,1
Terciária	4 a 6:1	-	25,4 a 3,2
Quaternária	até 20	76,2 ou 31,8	2,1 a 1,3

Fonte: Chaves e Peres (2003).

Em um britador cônico, Figura 1, o motor provoca o giro da unidade excêntrica através de uma transmissão de engrenagens, que por sua vez provoca a revolução excêntrica da extremidade inferior do veio principal. Na parte de cima do veio principal encontra-se o rolamento da aranha que atua como ponto pivô para este movimento de revolução excêntrica. O manto está preso ao veio principal e o côncavo está preso ao corpo superior, quando a distância entre eles diminui, o material a ser processado será sujeito a uma força de compressão, sendo esmagado. Em seguida o manto se afasta do

côncavo e o material pode escoar para a câmara. Então o mineral é britado entre duas superfícies rígidas, o manto e o côncavo, onde são partidos, comprimidos e esmagados. O manto e o côncavo devem ser regularmente substituídos uma vez que estão sujeitos a um desgaste contínuo (SANDVIK, 2007).

Figura 1 – Esquema de funcionamento de um britador cônico CH660.



Fonte: Sandvik (2007).

O britador CH660 é um britador tipo cônico usado para processamento de minerais e pode ser aplicado em recintos abertos ou fechados. A velocidade do veio do pinhão é de ~1080 RPM. As espessuras do manto e do côncavo dependem do perfil aplicado e variam de 90mm a 40mm e 90mm a 30mm, respectivamente. O manual do fabricante recomenda que sejam usadas ligas de aço manganês. A capacidade nominal na câmara de britagem é de 150 a 650 t/h (SANDVIK, 2007).

Conforme o manual do britador CH660, Sandvik (2007), são possíveis vários perfis de manto e de côncavos. O perfil dos revestimentos do britador irá determinar o número de eventos em que ocorrerá a compressão da partícula e a velocidade de fluxo de material na câmara de britagem. Quanto menor a inclinação do manto, menor a capacidade do britador. Outro fator importante é o APF (abertura de posição fechada) que determina a razão de redução do material (SILVEIRA, 2009).

Observa-se que com o empobrecimento do teor de ferro nas jazidas brasileiras, iniciou-se a exploração principal de itabiritos compactos, uma rocha constituída de camadas alternadas de quartzo e óxidos de ferro, com teor de ferro < 50% (VARELA, 2013), que contém a sílica como principal componente e é caracterizada por cristais pontiagudos (cristal de quartzo) que podem contribuir para a aceleração do desgaste dos revestimentos de britadores, ocasionando a necessidade de manutenções sistemáticas.

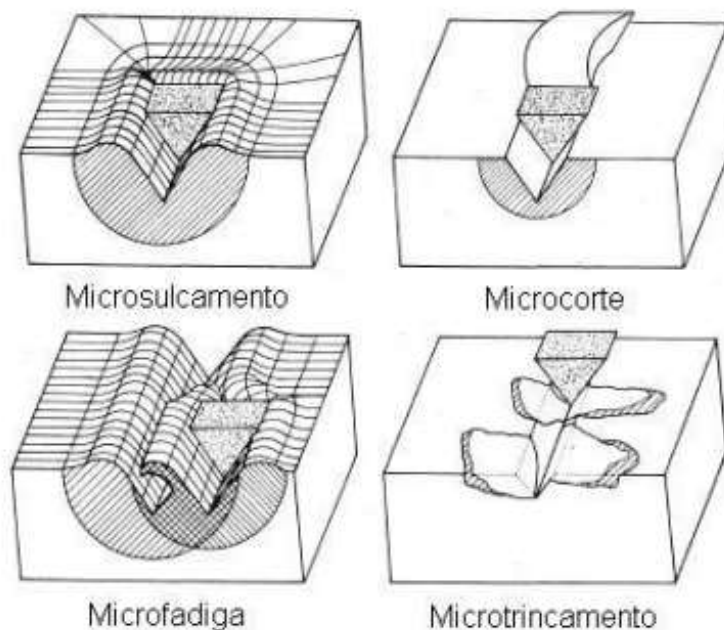
3.3 Mecanismos de desgaste em revestimentos de britadores

O desgaste de materiais está entre os mecanismos de falha em componentes mecânicos mais relevantes em termos econômicos para diversas indústrias, dentre elas a mineração. Estudos apontam que o desgaste sofrido por componentes de britadores e moinhos representam aproximadamente 50% do custo total nesses processos. A resistência ao desgaste não é uma propriedade intrínseca do material, ela é determinada a partir de todo o sistema envolvido, como a carga aplicada, temperatura, meio, condições de operação, área de contato, acabamento superficial, lubrificação, características físico-químicas do abrasivo e do material (BARRA & PINTAÚDE, 2022; ZUN GAHR, 1987).

Conforme a ASTM G40-21 existem quinze terminologias acerca do desgaste, são elas: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, erosão por cavitação, desgaste corrosivo, desgaste por corte, desgaste por fadiga, desgaste por *fretting*, desgaste por impacto, erosão por impacto de líquidos, desgaste por rolamento, desgaste por deslizamento, erosão por impacto de sólidos, desgaste abrasivo a três corpos e desgaste abrasivo a dois corpos. Em britadores e moinhos verifica-se desgaste abrasivo a três corpos e por impacto (CORONADO MARIN, 2010).

Correlacionando-se os tipos, modos, mecanismos de desgaste e dano superficial existentes no desgaste abrasivo, verifica-se que ele pode ser causado em interfaces de dois e três corpos. O desgaste abrasivo de dois corpos está associado ao mecanismo de microcorte e tem como principal dano o riscamento da superfície. Já o de três corpos está relacionado ao mecanismo de desgaste por fadiga e provoca danos como múltiplas impressões, sulcamentos e polimento. Os mecanismos do desgaste abrasivo podem ser divididos em dois grupos, mecanismos de abrasão por deformação plástica (microsulcamento e microcorte) e mecanismos de deformação por fratura frágil (microtrincamento), como exemplificado na Figura 2 (HUTCHINGS, 1992; ZHU et al., 2018; ZUN GAHR, 1987).

Figura 2 – Mecanismos de desgaste abrasivo. A) Microsulcamento. B) Microcorte. C) Microfadiga. D) Microtrincamento.



Fonte: ZUN GAHR, 1987.

Kelly & Spottiswood (1982) citam que os principais mecanismos que ocorrem na cominuição são: compressão, impacto, atrito e abrasão. No processo de compressão ocorre propagação lenta da força executada sobre a rocha, observa-se a quebra pela ação da componente oblíqua da força aplicada à superfície da partícula, a quantidade relativa de finos é muito maior que de grossos. O impacto é caracterizado por uma aplicação rápida de esforços cuja intensidade supera a resistência da partícula à fragmentação, o produto resultante da quebra possui tamanho e forma semelhantes e granulometria fina. O atrito trata-se da resistência que fragmentos de minério opõem quando se movem uns sobre os outros. Já a abrasão é um tipo de desgaste causado pelos fragmentos da rocha, quando estes situam-se entre duas superfícies que se movimentam em sentidos opostos.

Varela *et al* (2021) demonstraram em seus estudos que as condições de abrasão-impacto são um dos principais modos de desgaste em revestimentos de britadores de rolos em jaspelito. Os autores caracterizaram o desgaste em componentes de britadores de rolos aplicados na mineração de minério de ferro e os resultados mostram que há diversas marcas de desgaste abrasivo, alta deformação e formação de rachaduras nos segmentos do britador, os danos foram divididos em escala micro (micro-trincamento, micro-sulcamento e micro-corte) e macro (grandes crateras e marcas de abrasão milimétrica).

3.4 Aços Hadfield

Os aços austeníticos de alto teor de manganês, são muitas vezes chamados de aços Hadfield. A norma que rege as concentrações de analitos do aço Hadfield é a ASTM 128 (Figura 3). O aço Hadfield foi inventado por Sir Robert Abbott Hadfield em 1882. Hadfield (1982) relata que a proporção de carbono/manganês de 1/10 é ideal para a obtenção das melhores propriedades mecânicas de resistência à tração, desgaste e tenacidade à fratura. Venturelli (2018) mostrou em seus estudos que o aço Hadfield no estado bruto de fusão possui microestrutura austenítica metaestável com carbonetos eutéticos interdendríticos, carbonetos contínuos intergranulares e colônias de perlitas.

Figura 3 – Composições do aço Hadfield conforme a ASTM 128.

Grade ^A	Composition, %						
	Carbon	Manganese	Chromium	Molybdenum	Nickel	Silicon	Phosphorus
A ^B	1.05-1.35	11.0 min	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-1	0.9 -1.05	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-2	1.05-1.2	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-3	1.12-1.28	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-4	1.2 -1.35	11.5-14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
C	1.05-1.35	11.5-14.0	1.5-2.5	...	...	1.00 max	0.07 max
D	0.7 -1.3	11.5-14.0	...	...	3.0-4.0	1.00 max	0.07 max
E-1	0.7 -1.3	11.5-14.0	...	0.9-1.2	...	1.00 max	0.07 max
E-2	1.05-1.45	11.5-14.0	...	1.8-2.1	...	1.00 max	0.07 max
F (J91340)	1.05-1.35	6.0-8.0	...	0.9-1.2	...	1.00 max	0.07 max

Fonte: adaptado de ASTM 128 (2003).

As propriedades do aço Hadfield ainda geram muitas controvérsias, o que se deve ao comportamento destes materiais ser dependente de vários fatores como por exemplo, composição química, temperatura de trabalho, tamanho de grão, solicitação mecânica, entre outros. De forma geral pode-se apontar baixa resistência à abrasão quando comparados ao ferro fundido branco alto cromo, baixo limite de escoamento, elevado alongamento e resistência à tração (SCHROEDER, 2015). Tsujimoto (1979) relatou que a dureza do aço Hadfield não é uniforme principalmente em função das diferentes orientações cristalográficas dos grãos austeníticos e da distribuição das subestruturas de deformação. A Tabela 2 apresenta um resumo das principais propriedades do aço Hafield.

Tabela 2 – Resumo de propriedades do aço Hadfield.

Limite de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Redução de área (%)	Módulo de Young (Gpa)	Dureza Brinell	Energia absorvida no impacto (J/cm ²)
320-360	700-1000	30-40	186	185-220	110-180

Fonte: adaptado de Avery (1949).

Albertoni (2017) aborda que os aços Hadfield, ao sofrerem deformação plástica têm um aumento significativo em sua dureza, sendo que a capacidade de encruamento

aumenta conforme a energia de impacto se eleva, acima da energia de impacto, o encruamento se dá pela maclação. O autor ainda cita que a resistência à abrasão desses aços é dependente do encruamento. Chiaverini (1988) cita que o aço Hadfield é provavelmente um dos aços que mais podem ter a sua dureza elevada por encruamento, sendo visto uma alteração de 200 para valores entre 500 e 600 Brinell através de impacto. Entretanto a alta taxa de encruamento do aço Hadfield em serviço ainda não é compreendida.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O material do revestimento usado neste trabalho foi um aço Hadfield, cuja especificação cita uma faixa de manganês entre 11,5% e 13,5%, cromo entre 1,3% e 2,0% e carbono entre 1,10 e 1,23%. Essa liga foi utilizada para a confecção de revestimentos do manto (Figura 4) e côncavo (Figura 5) que foram aplicados na britagem quaternária em uma usina de beneficiamento de minério de ferro do quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais. As análises foram realizadas após o par de revestimentos chegar ao fim de vida útil, cuja troca é definida em ~800 horas operadas. Os revestimentos em questão processaram um minério de ferro com tamanho máximo de partícula é 55 mm e a composição é estimada em 46,2% de ferro e 39,4% de sílica.

Figura 4 – Imagem do revestimento do manto após 800 horas operadas.



Fonte: O autor.

Figura 5 – Imagem do revestimento do côncavo na posição de montagem após 800 horas operadas.



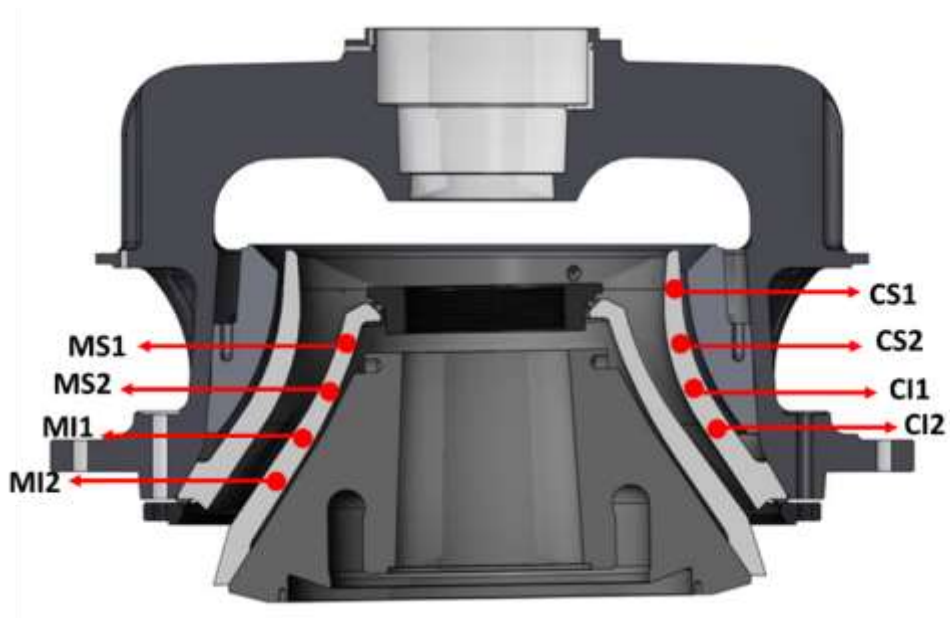
Fonte: O autor.

4.2 Métodos

4.2.1 Análise de dados de vida

O estudo estatístico para determinação da vida útil foi realizado com auxílio do software Weibull ++, ReliaSoft 2021. Os dados trabalhados são referentes ao acompanhamento da taxa de degradação do par de revestimentos (manto e concavo), de cinco britadores quaternários, modelo CH660, instalados em uma usina de beneficiamento de minério de ferro. As medições da espessura foram realizadas mensalmente, no período de um ano, nas paradas gerais de britagem, com o auxílio de um ultrassom USM/DMS GO+, conforme a representação da Figura 6, definiu-se quatro pontos de medição, com distância de separação de aproximadamente 100mm no sentido vertical.

Figura 6 – Representação esquemática da posição de medições de espessura dos revestimentos de côncavo e manto. MS1 – manto superior 1; MS2 – manto superior 2; MI1 – manto inferior 1; MI2 – manto inferior 2; CS1 – côncavo superior 1; CS2 – côncavo superior 2; CI1 – côncavo inferior 1; CI2 – côncavo inferior 2.



Fonte: O autor.

Inicialmente realizou-se a modelagem da degradação de cada região das peças, conforme descrito na Figura 6 e a partir dos dados de extrapolação da degradação, obteve-se a vida residual falha/suspensão para a realização da análise de dados de vida das peças.

4.2.2 Análise química

As análises químicas foram realizadas com o objetivo de avaliar se o aço analisado possuía porcentagens de analitos condizentes com o aço Hadfield. A análise de porcentagem em peso foi realizada em São Carlos, SP, no laboratório da empresa Materials Institute of Brazil (MIB), por espectrometria de emissão óptica por centelhamento, em um equipamento Anacom Científica, modelo B2ADV. A identificação do Carbono (C) e do Enxofre (S) foi feita por combustão.

4.2.3 Microscopia óptica

Com o intuito de visualizar e analisar a superfície desgastada, foram realizadas análises de microscopia óptica, que foram feitas por meio de um microscópio da Olympus, modelo BX53M, no laboratório do Instituto Tecnológico Vale, em Ouro Preto MG.

4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em um equipamento JEOL IT-200, e serão apresentadas imagens com aumento de 2000X.

4.2.5 Microdureza

Medições de microdureza foram realizadas fazendo endentações em função da distância da superfície desgastada, utilizando o método Vickers com carga de 50 gramas. Para cada distância da superfície foram realizadas 5 medições. Os ensaios foram realizados no laboratório do Instituto Tecnológico Vale (ITV), em Ouro Preto MG, em um Vickers Hardness Testing Machine HV-100.

4.2.6 Macro dureza

Para a realização das medições de dureza, utilizou-se um durômetro Wilson Hardness RockWell 2000. Os ensaios foram realizados no laboratório do Instituto Tecnológico Vale (ITV), em Ouro Preto MG.

4.2.7 Ensaio de abrasão

O ensaio de abrasão utilizado foi o “roda de borracha”, que seguiu a norma ASTM G65, utilizando uma carga 130N, por 10 min, à 200 RPM, com areia IPT N50, com vazão de 300g/min, a dureza da borracha usada como revestimento da roda utilizada é 64 shore A. Os ensaios foram realizados no laboratório de tribologia do Instituto Tecnológico Vale, em Ouro Preto, Minas Gerais.

4.2.8 Ensaio de resistência ao impacto (Charpy)

O ensaio de resistência ao impacto charpy foi realizado conforme a norma ASTM E23-18, em uma máquina Time JB300, martelo de 300J, tipo A, à 23°C.

4.3 Análise de falha

Durante o desenvolvimento deste estudo, observou-se que alguns mantos não alcançaram as 873 horas de operação previstas no estudo estatístico. Para entendimento das causas fundamentais da falha, coletou-se uma amostra de dimensional 300x300mm, deixando-se a região de nucleação da trinca em uma posição central, de um revestimento de manto que performou por apenas 259,7 horas, que aqui será chamado de MX. A análise de falha consistiu em análise visual, passando por procedimentos de limpeza, registro fotográfico e identificação de aspectos da falha na escala macro. Posteriormente, regiões específicas da amostra foram analisadas via MEV-EDX em um equipamento JEOL IT-200. Foi realizada a análise química da amostra (utilizando a mesma metodologia descrita no tópico 4.2.2, micrografia óptica (Corte, embutimento em baquelite, lixamento, polimento, ataque Nital 2%), análise de tamanho de grão conforme ASTM E112-13 (Microscópio óptico Olympus BX41M), de dureza (Dureza Rockwell B, ASTM E18-20. Durômetro Wilson, modelo 4 JR), ensaios de tração (Máquina Instron 2382 (100 kN capacidade), controle de deslocamento, 0,5 mm/min, 8 mm/min (até fratura), $L_0=4D=24$ mm, CPs ensaios conforme ASTM E8-21) e impacto (Impacto Charpy, ASTM E23-18, utilizando Máquina Time JB300, martelo de 300J, tipo A, 23°C).

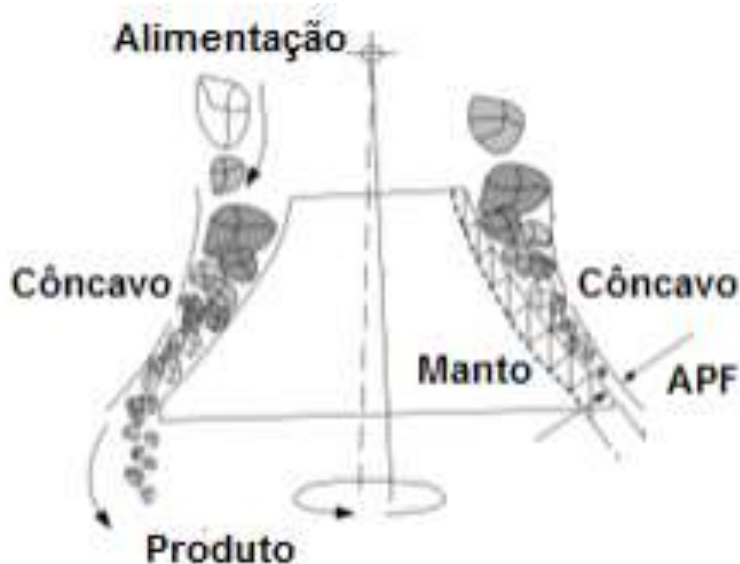
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 O Tribossistema

Conforme já relatado na revisão bibliográfica deste trabalho, os britadores cônicos possuem um eixo rotativo, cujo revestimento de proteção recebe o nome de manto, esse conjunto trabalha girando e esmagando o minério de ferro contra uma superfície (Figura 7), que também é um revestimento e recebe o nome de côncavo (SANDVIK, 2007).

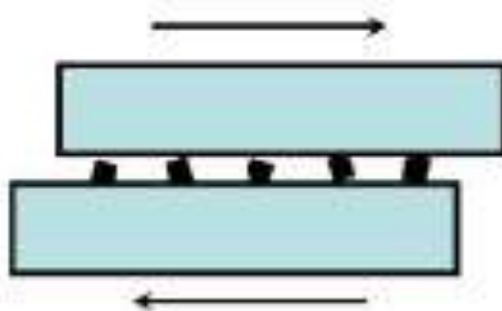
Uma das classificações de desgaste que envolvem o tribossistema de um britador é conhecida como "gouging abrasion", conforme proposto por Avery (1977). Nessa classificação, o abrasivo, que em geral, possui grande dimensões, passando da ordem de centímetros e chegando à ordem de metros, é fraturado. Gates (1998), que classifica o processo abrasivo em função de sua intensidade, propõe uma classificação de desgaste extremo que é compatível com o tribossistema de um britador, em que os abrasivos (minério britado) possui grandes dimensões, gerando elevadas tensões de contato, deformações macroscópicas e fratura frágil do material desgastado. No caso da britagem quaternária, um modelo que se assemelha mais à realidade é o de abrasão à três corpos (Figura 8).

Figura 7– Imagem representativa do funcionamento de um britador cônico alimentado por fragmentos de mineral.



Fonte: HULTHÉN (2010).

Figura 8 – Esquema representativo do modo de desgaste abrasivo à três corpos.

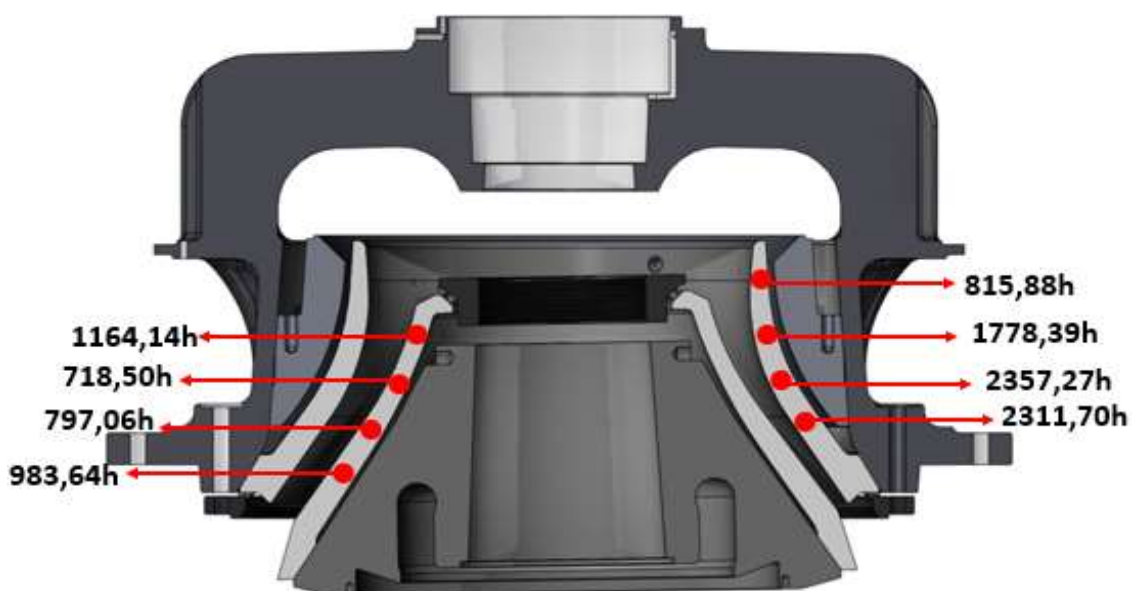


Fonte: Adaptado de Hutchings (1992).

5.2 Análise de taxa de degradação

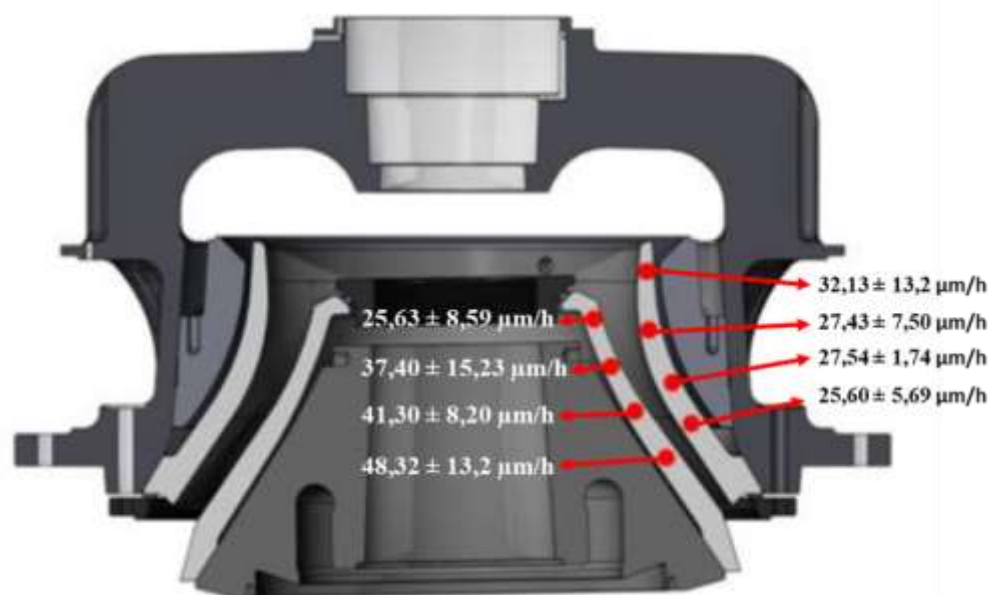
Na Figura 9 pode-se analisar a vida útil B20, isto é, com possibilidade de 20% de falha, das diferentes regiões do manto e do côncavo. Esses dados podem ser analisados juntos aos da taxa de desgaste dessas regiões, apresentados na Figura 10. Verifica-se para o côncavo vida útil menor e taxa de desgaste maior nas regiões superiores, enquanto para o manto a vida útil é menor e as taxas de desgaste são maiores em regiões mais centralizadas.

Figura 9 - Vida B20 das regiões de medição dos revestimentos.



Fonte: O autor.

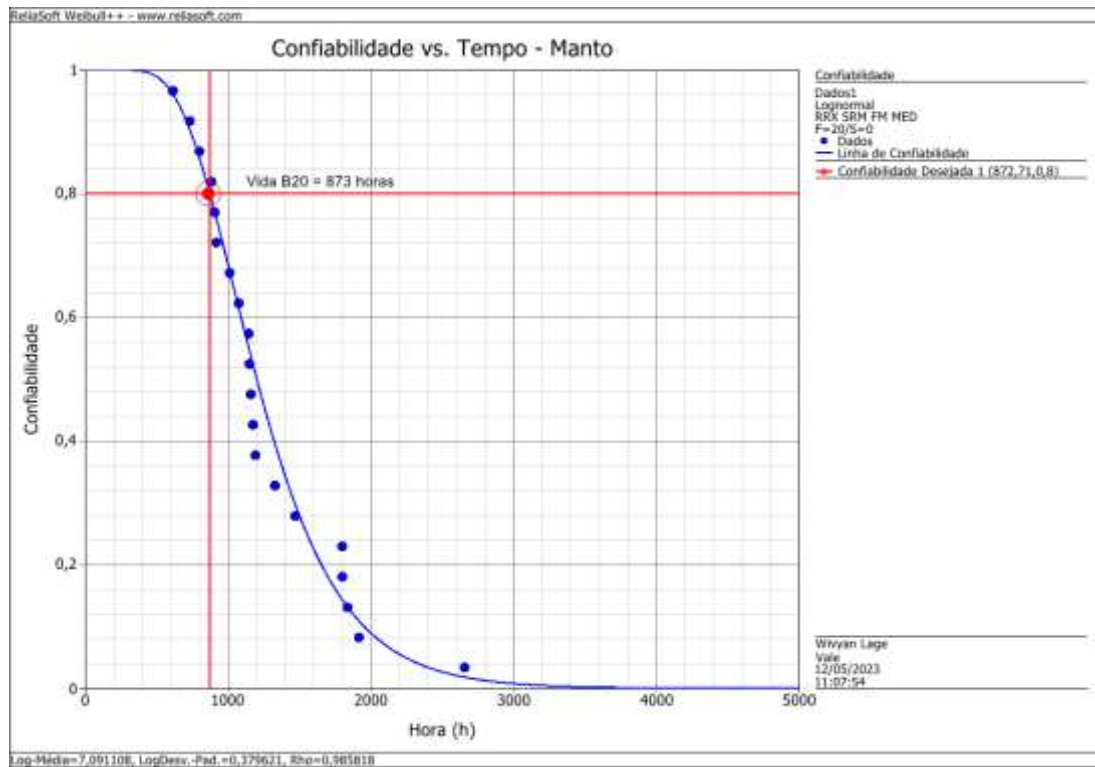
Figura 10 – Representação das taxas de desgaste nas diferentes regiões do manto e do côncavo.



Fonte: O autor.

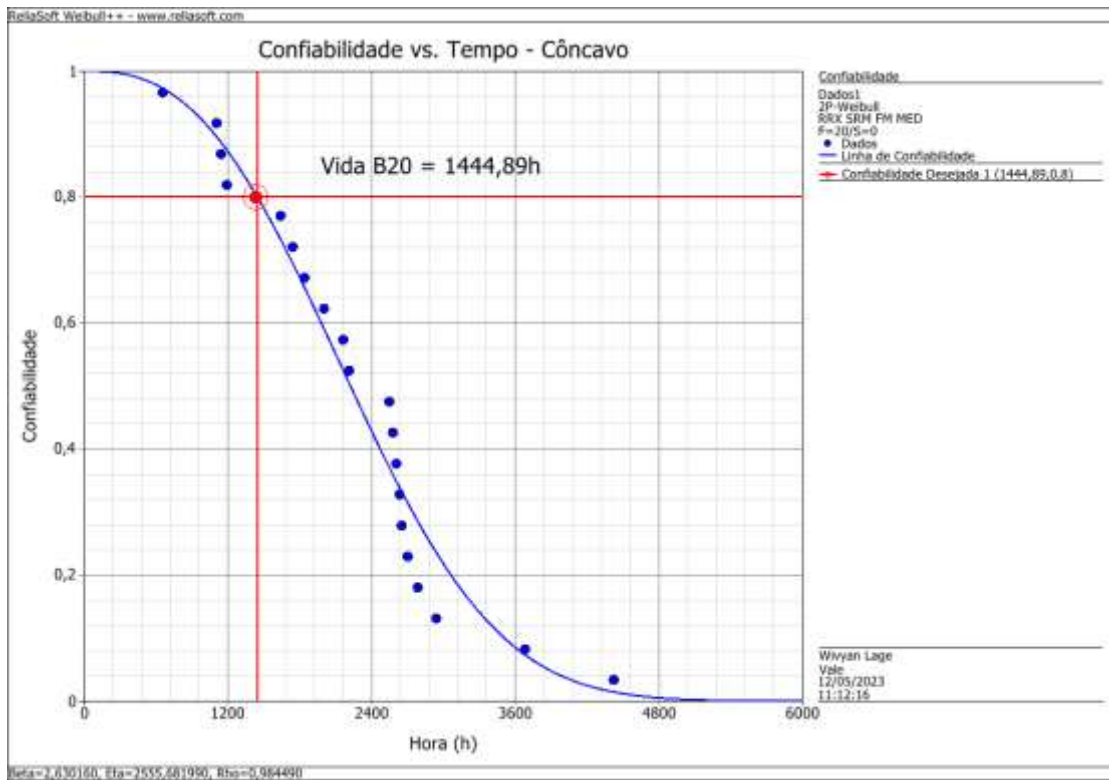
A partir dos dados referentes à taxa de degradação de cada região, foi possível obter os dados de extrapolação de vida útil residual falha/suspensão e usá-los para a obtenção de duas curvas: Confiabilidade no tempo – Manto (Figura 11) e Confiabilidade no tempo – Concavo (Figura 12), pelas quais foi possível determinar a vida B20 das peças como um todo. Calculou-se uma vida B20 do manto em 873 horas, enquanto a do côncavo ficou estimada em 1440,89 horas. Observando-se um britador em funcionamento, pode-se sugerir que as diferentes taxas de degradação das regiões podem estar relacionadas aos diferentes esforços físicos sofridos por cada região das peças e pelas diferentes interações que minério de ferro possui com o manto e com o côncavo, fato que pode estar refletindo na vida útil de ambos.

Figura 11 – Confiabilidade vs. Tempo – Manto.



Fonte: O autor.

Figura 12 - Confiabilidade vs. Tempo – Côncavo.



Fonte: O autor.

5.3 Caracterização dos materiais do côncavo e manto.

5.3.1 Análise química

Na Tabela 3 estão dispostos os dados referentes à análise química das amostras do Manto Superior (MS), Manto Inferior (MI), Concavo Superior (CS) e Côncavo Inferior (CI). Comparando-se com as faixas de composição dos analitos citadas na ASTM 128 grau C (Carbono: 1 – 1,35%, Manganês: 11,5 – 14%, Cromo: 1,5 – 2,5%, Silício: 1% máx e Fósforo: 0,07% máx), pode-se sugerir que todas as amostras são inspiradas no aço ASTM 128 grau C (vide Figura 4), também conhecido como aço Hadfield.

Tabela 3 – Análise química das amostras Manto Superior (MS), Manto Inferior (MI), Concavo Superior (CS) e Côncavo Inferior (CI).

Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Cu	Fe
Manto Superior (MS)	1,09	0,64	10,7	0,043	0,075	1,54	0,14	0,22	0,034	0,007	0,05	0,09	Bal
Manto Inferior (MI)	1,04	0,64	11,5	0,046	0,075	1,41	0,13	0,23	0,037	0,006	0,05	0,09	Bal
Côncavo Superior (CS)	1,02	0,96	12	0,055	0,068	1,54	0,11	0,27	0,041	0,007	0,05	0,1	Bal
Côncavo Inferior (CI)	1,04	0,96	11,9	0,058	0,068	1,54	0,1	0,27	0,042	0,006	0,05	0,1	Bal

Fonte: O autor.

5.3.2 Estereoscopia das amostras de manto e côncavo

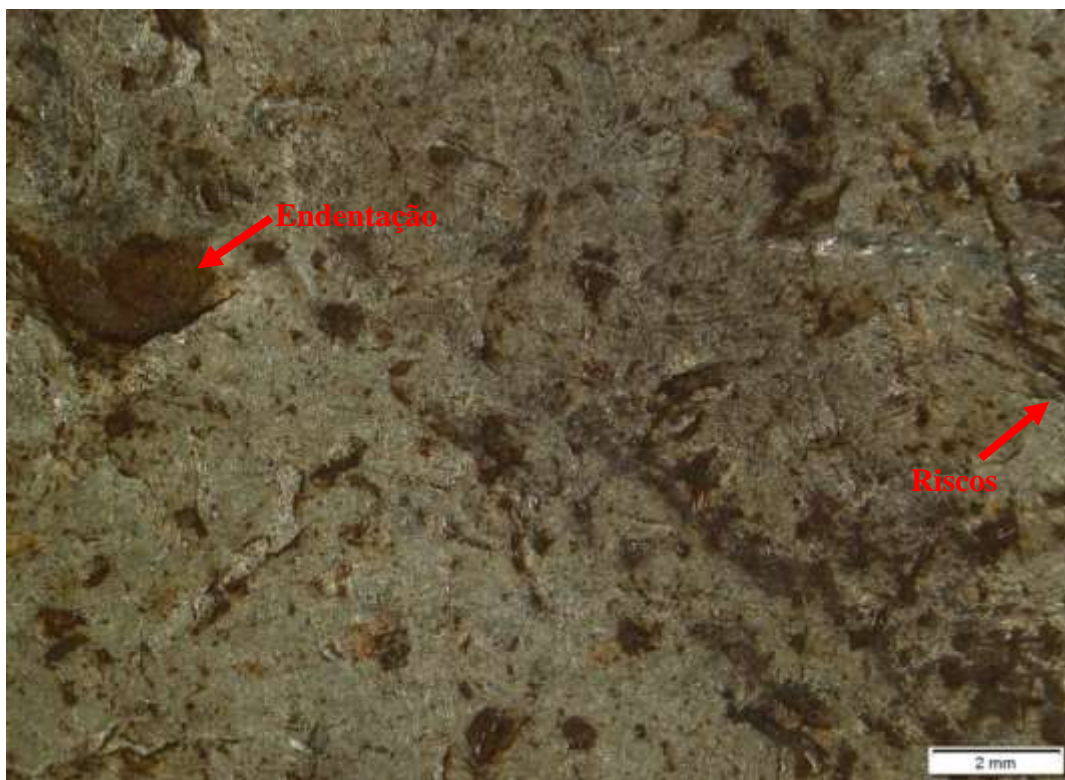
As Figuras 13 e 14 apresentam imagens obtidas por lupa estereoscópica das superfícies de desgaste das amostras de manto e côncavo respectivamente. Observa-se em ambas as amostras, marcas características de desgaste abrasivo por riscamento e por rolamento, observa-se também endentações que são características de compressão e impacto do minério britado. Pode-se analisar visualmente que a imagem do côncavo possui mais pontos de endentações e riscos do que as do manto. Analisando-se esses resultados em conjunto com a Figura 7, observa-se que o revestimento do manto gira de forma a projetar o minério contra o côncavo enquanto ocorre também um movimento induzido ao esmagamento do material, isso pode explicar o fato de o côncavo visualmente ter um aspecto de ter sofrido desgaste abrasivo e por impacto mais severos que o manto. Em resumo pode-se avaliar que os mecanismos de desgaste observados nesta análise podem ser descritos como compressão/impacto e abrasão.

O desgaste abrasivo que ocorre nos revestimentos pode ser classificado como de abrasão a três corpos que é formado entre o manto e o côncavo do britador e o minério que é britado. Como existem esforços que induzem grandes tensões de compressão nas superfícies e considerando que, ao mesmo tempo, o manto que se movimenta, girando de forma excêntrica, gera altas tensões de cisalhamento. Quando o minério é comprimido contra o côncavo (que é fixo), resultando em cargas de impacto e compressão do minério britado que se fragmenta, fazendo com que a superfície seja comprimida e deformada plasticamente. À medida que o manto gira, uma tensão de cisalhamento é gerada entre o minério e a superfície. O minério então pode deslizar e ser comprimido, resultando em mecanismos de abrasão de corte e sulcamento. Simultaneamente, a tensão de compressão imposta causa deformação plástica repetida, e inúmeras cavidades são formadas nas superfícies como pode-se ver na Figura 13 e na Figura 14, nomeando esse mecanismo como endentação. Como é um processo repetitivo, no fundo dos defeitos de endentação, ocorre nova deformação e a plasticidade é exaurida para formar uma fratura localizada, promovendo remoção de material das superfícies.

No processo de britagem em equipamentos cônicos, existe uma elevada força de britagem e uma alta velocidade de rotação, que sob ação de compressão e cisalhamento a superfície é submetida a cargas periódicas de fadiga de contato. As trincas de fadiga podem ocorrer na camada superficial, resultando mecanismos de remoção por fadiga.

Essas observações, reforçam a necessidade de os revestimentos de britadores cônicos possuírem elevada tenacidade e resistência mecânica suficiente para resistir às altas cargas impostas de impacto, compressão e abrasão.

Figura 13 – Imagem de microscopia óptica da amostra do manto.



Fonte: O autor.

Figura 14 - Imagem de microscopia óptica da amostra do cômavo.



Fonte: O autor.

5.3.2 Microestrutura das amostras de manto e cômavo

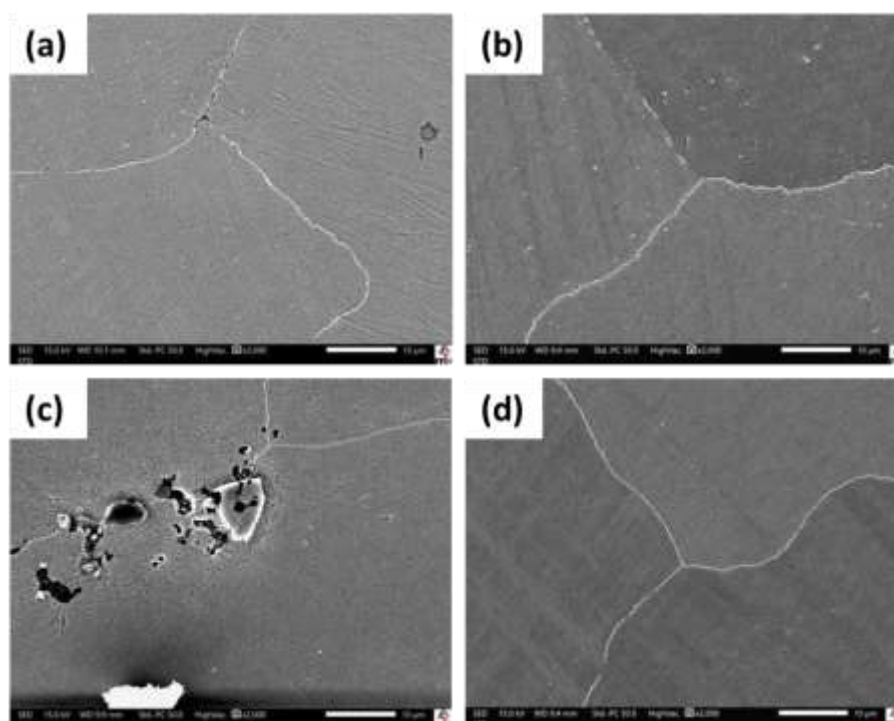
A Figura 15 apresenta as microestruturas das amostras observadas por MEV. A Figura 15a e a Figura 15c mostram as microestruturas do manto e do côncavo próximo à superfície desgastada, respectivamente. Em ambas as amostras é possível observar uma microestrutura predominantemente austenítica com a presença de um filme contínuo de carbonetos no contorno de grão. Observe que a microestrutura indica a presença de deformação, possibilitando observar o mecanismo de maclação. Adicionalmente, na amostra do manto (Figura 15c), observa-se uma inclusão de MnS e microrechupes. A presença de sulfetos nas amostras do manto está associada a mais enxofre na composição química. A Figura 15b e a Figura 15d mostram a microestrutura do manto e do côncavo em regiões mais distantes da superfície desgastada, respectivamente. Assim como nas regiões próximas à superfície desgastada, observa-se uma microestrutura predominantemente austenítica com a presença de um filme contínuo de carbonetos no contorno de grão.

As micrografias mostradas na Figura 15 estão em uma ampliação de 2000x, permitindo a visualização dos filmes de carboneto. Esses filmes de carboneto não foram observados em ampliações menores, como 100x, aproximação que amplamente utilizada no controle de qualidade pelas indústrias que produzem esse tipo de material. Venturelli et al. relataram que o resfriamento lento em moldes de areia ou reaquecimento entre 400 °C e 800 °C permite a formação de carbonetos intergranulares contínuos que atuam como concentradores de tensões, enfraquecendo o material. Apesar deste defeito não ter grande importância quando detectado no aumento de 2000x, é um ponto que merece atenção e que pode ser melhorado no processo fabricação deste material, em especial na etapa de tratamento térmico (solubilização e resfriamento). No entanto, em uma análise de falha de revestimentos de britadores de rolos, Varela et al. (2021) mostraram a ocorrência de trincas no material devido à presença de carbonetos ao longo dos contornos de grão e que as trincas nuclearam e se propagaram ao longo dos contornos de grão com a presença de carbonetos. Zavadil e Kuyucak (2004) estudaram o efeito do teor de carboneto nos contornos de grão em aços Hadfield. Os autores mostraram que quanto menor a quantidade de carboneto ao longo dos limites de grão resulta em maior resistência ao impacto dos aços Hadfield. No entanto, a espessura dos precipitados é importante, onde precipitados mais finos que 0,5 µm não contribuem para a fragilização do material, enquanto precipitados mais espessos que 0,5 µm podem contribuir para a fragilização do

aço. Tanto no côncavo quanto no manto, os precipitados observados ao longo dos contornos de grão foram menores que $0,5\ \mu\text{m}$.

Como não foi observado trinca no contorno de grão ou qualquer outro efeito prejudicial devido à presença de filmes de carbonetos ao longo dos contornos de grão, a aplicação deste material para britadores de revestimento no sistema estudado não parece exigir alta resistência ao impacto ou alta tenacidade, como no caso de britadores primários, em que a presença de filmes, mesmo aqueles com espessura inferior a $0,5\ \mu\text{m}$, poderiam contribuir para a nucleação e propagação de trincas nessas regiões.

Figura 15 – Microestrutura das amostras observadas por MEV. A) Manto Superior. B) Manto Inferior. C) Concavo Superior. D) Concavo Inferior.

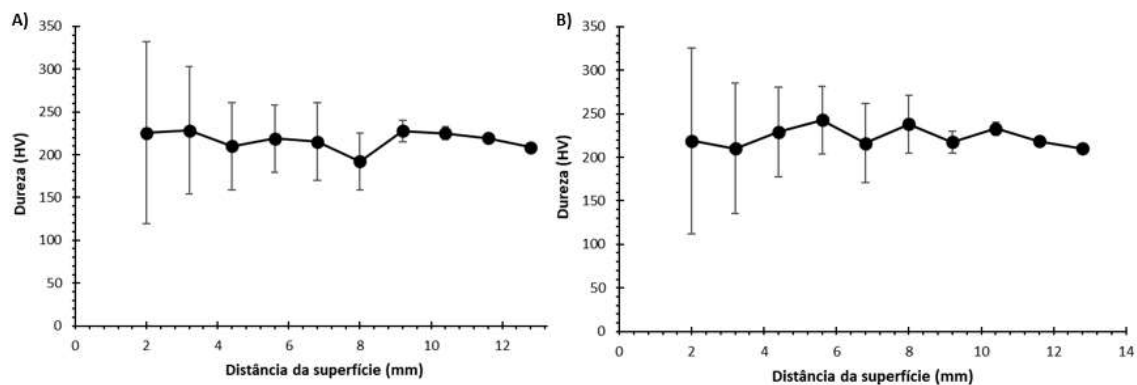


Fonte: O autor.

5.3.3 Macro dureza e Micro dureza Vickers

Na Figura 16 estão apresentados os resultados referentes à macro dureza Vickers das amostras de manto e côncavo. Na especificação usada para a aquisição desses materiais consta uma dureza inicial compreendida entre 160 e 210 HB, o que equivale a uma faixa de 168 a 220 HV. Por meio da análise de macro dureza não é possível observar o encruamento do material, por isso foi realizada a análise de micro dureza.

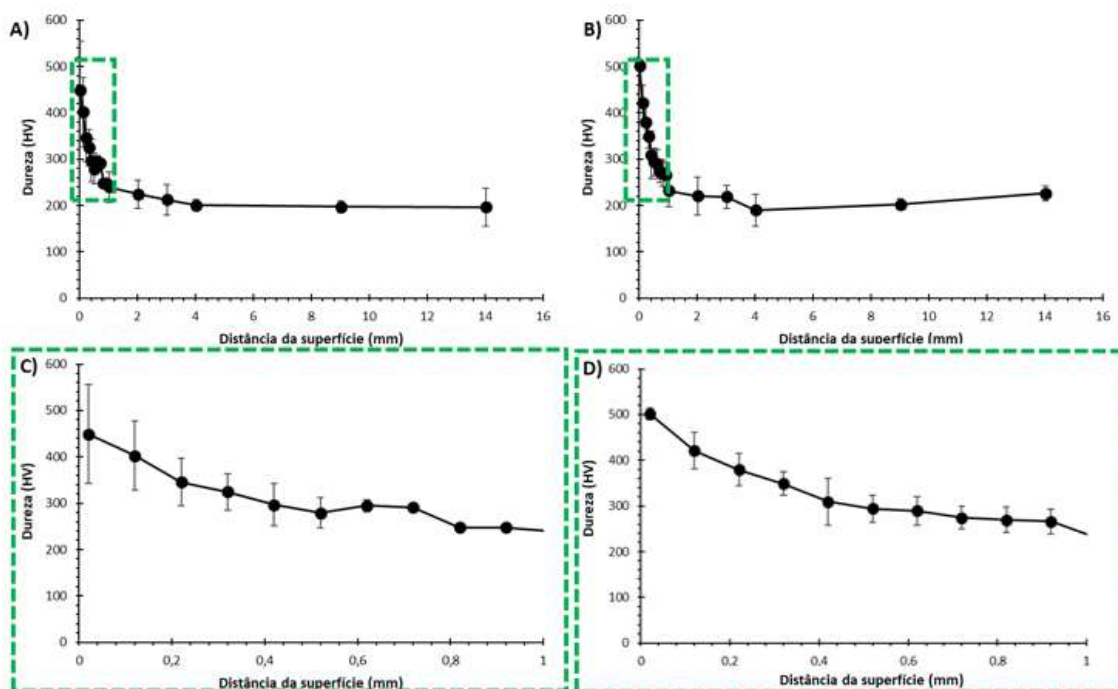
Figura 16 – Apresentação dos resultados referentes à macro dureza Vickers. A) Manto, B) Côncavo.



Fonte: o autor.

Na Figura 17 pode-se analisar os resultados referentes à microdureza Vickers das amostras de manto e côncavo. Observa-se que a dureza varia consideravelmente da borda ao núcleo, o que sugere o endurecimento da superfície, ou seja, há indícios de que ocorreu o encruamento do material. Pode-se salientar também que a dureza superficial do côncavo é maior que a do manto, o que pode estar relacionado aos esforços submetidos durante o trabalho. Esses resultados de endurecimento reforçam as observações feitas sobre as superfícies de desgaste, sobre as elevadas tensões impostas às superfícies dos revestimentos (manto e côncavo), que geram deformação plástica localizada.

Figura 17 – Apresentação dos resultados de microdureza Vickers. A) Manto – posição MI2. B) Côncavo – posição CI2. C) Zoom da região destacada em A. D) Zoom da região destacada em B.



Fonte: O autor.

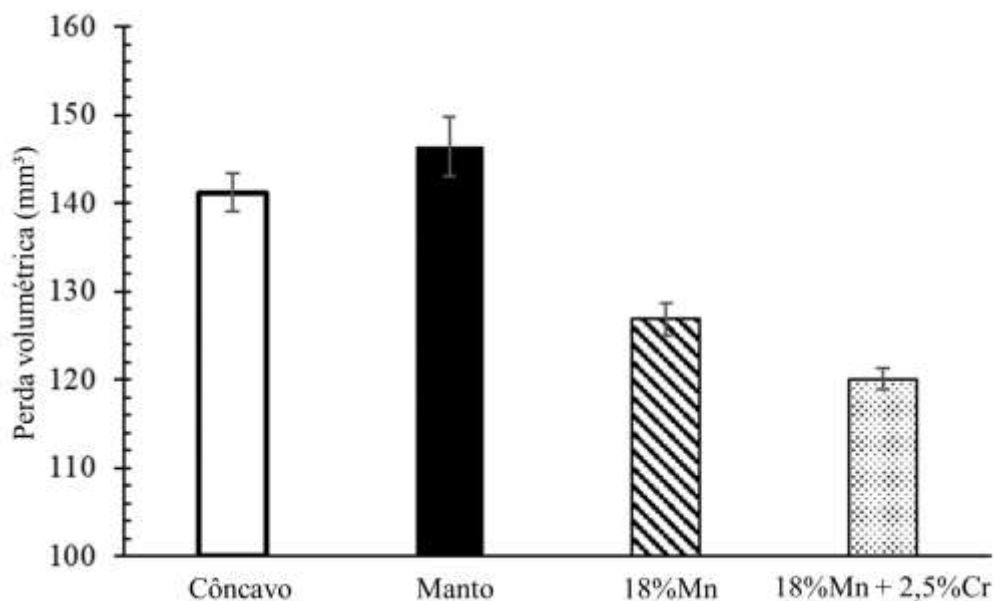
De acordo com as análises realizadas de mecanismos de desgaste e de endurecimento dos materiais analisados, reforça o fato do revestimento do britador de cone requerer elevada dureza superficial para resistir aos mecanismos de abrasão e capacidade de deformar e tenacidade para ter bom desempenho quanto a cargas de impacto e capacidade de fadiga de baixo ciclo, não gerando quebras do componente. Tendo em vista essa observação, foram então avaliadas ligas alternativas, de modo a aumentar a resistência à abrasão e/ou à resistência ao impacto, promovendo aumento de vida útil destes componentes.

5.3.4 Resistência à abrasão

A Figura 18 apresenta os resultados de resistência à abrasão obtidos pelo ensaio de roda de borracha. Comparando a perda volumétrica entre o manto e o côncavo, não se observa diferença estatística significativa entre ambos. Embora a perda volumétrica média do manto seja ligeiramente superior, os resultados são estatisticamente os mesmos quando se aplica o teste de hipóteses. Comparando os resultados do aço Hadfield aplicado na fabricação do manto e do côncavo com 12% Mn e 1,5% Cr com um aço Hadfield de 18% Mn, observou-se uma redução na perda volumétrica de 13%. A redução na taxa de desgaste de 18% é observada na comparação do aço Hadfield utilizado na fabricação do

manto e do côncavo com 12% Mn e 1,5% Cr com o aço Hadfield de 18% Mn e 2,5% Cr. A presença de cromo nos aços Hadfield aumenta a dureza inicial e a temperabilidade dos aços Hadfield. Este resultado mostra que é possível aumentar a resistência à abrasão dos aços Hadfield ajustando a composição química, principalmente aumentando a quantidade de Mn e Cr.

Figura 18 - Resultados do ensaio de resistência à abrasão das amostras de côncavo e manto.



Fonte: O autor.

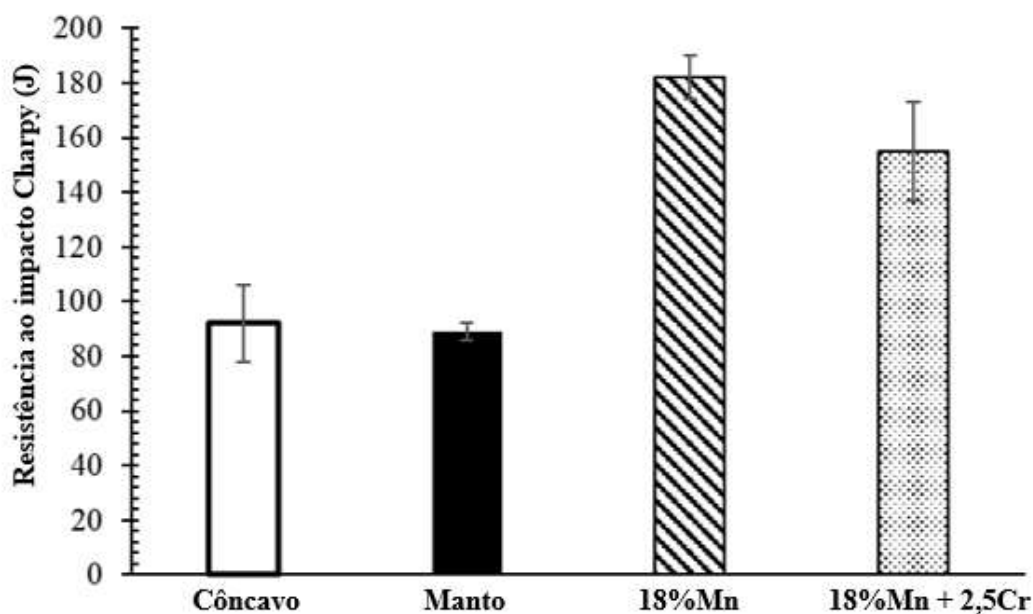
Como as avaliações do manto desgastado e côncavo mostraram que o mecanismo de abrasão é predominante e que a resistência à abrasão da liga aplicada está relacionada com a vida útil do componente, a aplicação de um aço manganês austenítico com 18% Mn e 2,5% Cr é interessante por ter maior resistência à abrasão, aumentando assim a vida útil dos componentes, reduzindo custos de manutenção e aumentando a disponibilidade dos equipamentos.

5.3.5 Resistência ao impacto

A Figura 19 apresenta os resultados referentes ao ensaio de resistência ao impacto Charpy realizado nas amostras de manto e côncavo. Verifica-se que a resistência ao impacto da amostra de côncavo é 3,4% maior que a do manto, apesar de não ser uma diferença tão relevante estatisticamente, esse fato pode estar atrelado a maior microdureza Vickers da amostra de côncavo. As amostras com quantidades superiores de Mn apresentaram maiores valores de resistência ao impacto. Esses resultados podem estar

associados ao efeito do Mn, também ao fato das amostras com maiores teores de manganês terem sido fabricadas em dimensões menores, o que facilita o tratamento térmico e garante uma microestrutura mais homogênea e predominantemente austenítica, sem carbonetos ou outras fases indesejadas. Porém, a literatura, Tressia (2021), mostra que aços Hadfield com teores de Mn compreendidos entre 15% e 18%, apresentam maior resistência ao impacto do que os aços Hadfield com 12% Mn. Portanto, os resultados apresentados na Figura 19 devem ser uma combinação da influência do teor de Mn e da geometria da amostra.

Figura 19 – Apresentação dos resultados de resistência ao Impacto Charpy das amostras de manto e côncavo.



Fonte: O autor.

5.4 Análise de falha

De forma complementar ao que foi explorado neste trabalho, foi realizada a análise de falha de um manto de britador que fraturou durante a operação. Essas análises são importantes para entender os possíveis mecanismos que podem causar a falha dos componentes, ajudando então na seleção de novas ligas e especificando propriedades e características requeridas para aplicação, por meio da criação de uma especificação técnica de material.

A análise de falha compreendeu as etapas de análise visual e análise em MEV da superfície de fratura, análise micrográfica em microscópio ótico, análise química e caracterização de propriedades mecânicas (tração, escoamento e impacto).

5.4.1 Análise química

Observa-se na Tabela 4, os resultados de análise química do manto MX. Pode-se afirmar que o material do revestimento se aproxima da especificação do ASTM A128 °C, todavia verifica-se que os elementos Manganês e Cromo estão abaixo do especificado.

Tabela 4– Análise química do MX.

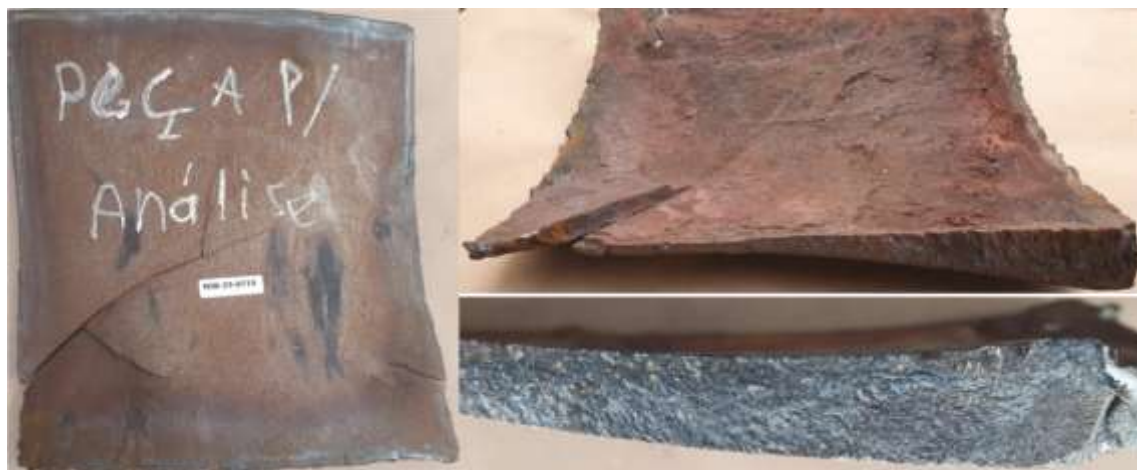
Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Cu	Fe
MX	1,12	0,66	10,3	0,052	0,00	1,03	0,5	0,16	0,02	0,00	0,031	0,04	Bal
ASTM A128 °C	1,05 - 1,35	1,0 max	11,5 - 14,0	0,07 max	NE	1,5- 2,5	NE	NE	NE	NE	NE	NE	Bal

Fonte: O autor.

5.4.2 Análise visual e MEV

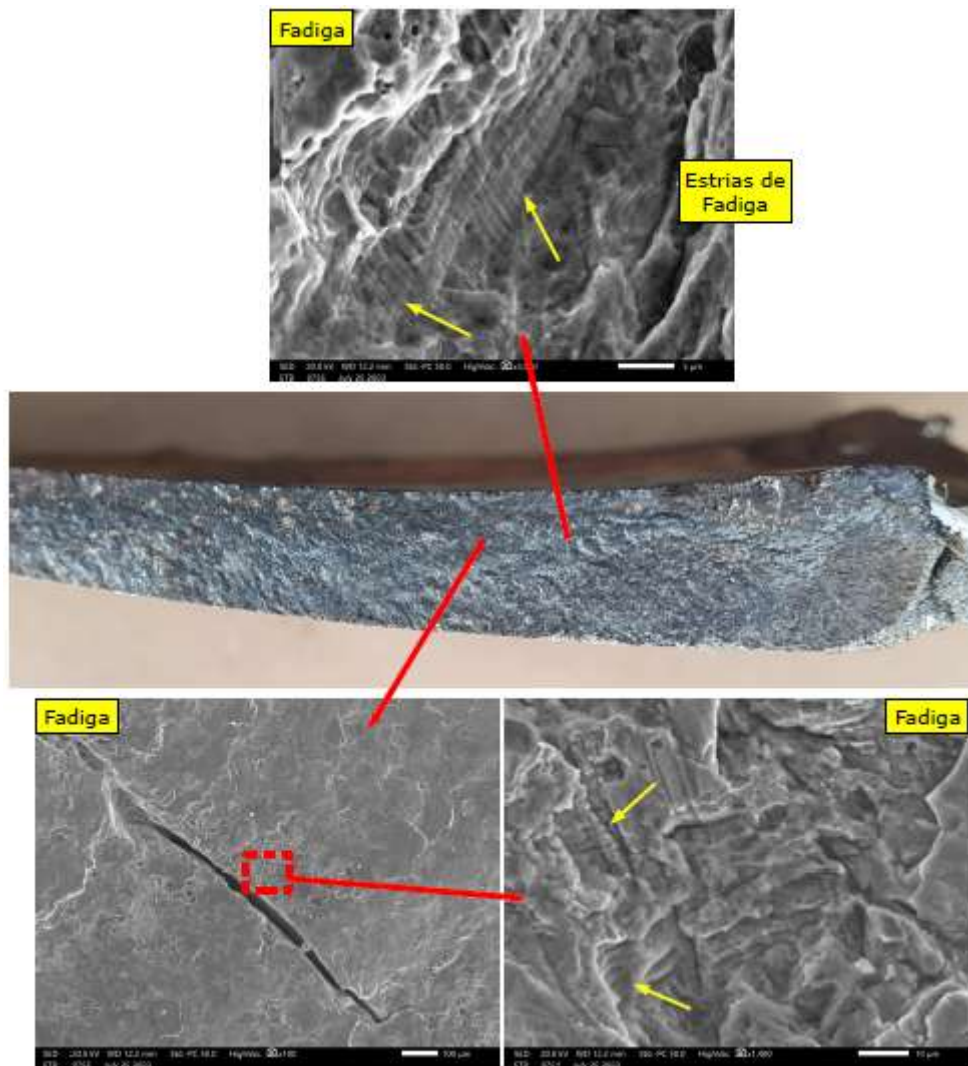
Observa-se nas análises fotográficas (Figura 20) a presença de trincas ramificadas no material, de aspecto plano, sem sinais de deformação plástica associada. A análise fractográfica via MEV mostra uma morfologia típica de fadiga, com a presença inequívoca de estrias (Figura 21). Um aspecto importante a ser notado é que as trincas estão localizadas em uma região da placa com significativa redução de espessura, o que favorece o aumento local de tensões e, conseqüentemente, a nucleação de trincas.

Figura 20 – Análise fotográfica das regiões de trincas da amostra do MX.



Fonte: O autor.

Figura 21 – Análise de MEV da amostra do MX. Estrias de fadiga estão indicadas por setas amarelas.



Fonte: O autor.

5.4.3 Análise de micrografia óptica

A análise micrográfica óptica da amostra, apresentada nas Figuras 22 e 23, indica uma microestrutura composta de austenita, com tamanho de grão ASTM classificado entre 1-2, com uma grande quantidade de microdefeitos no núcleo do material que podem ter contribuído para a nucleação de trincas de fadiga. Na superfície da amostra é possível observar a presença de uma camada de martensita, de dureza mais elevada, em torno de 456,3HV, como mostrado na Figura 22. A dureza de núcleo foi medida e o resultado foi de aproximadamente 190 HV.

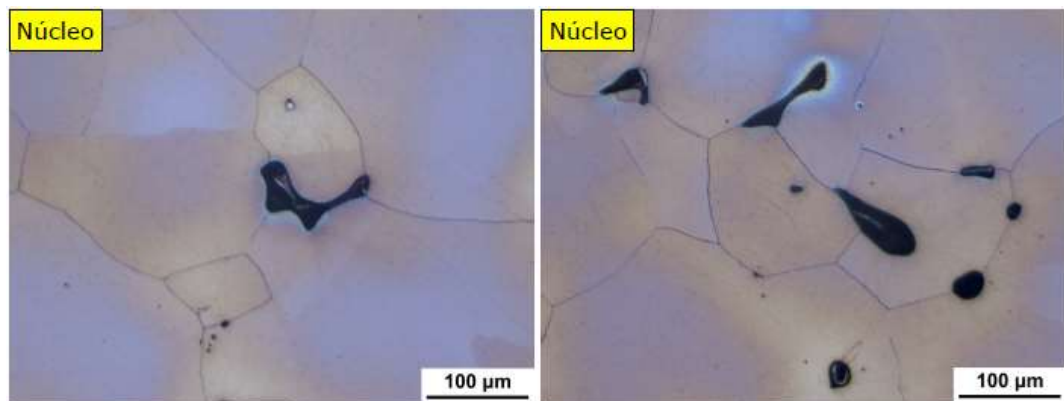
A presença de martensita pode indicar transformação martensítica induzida por deformação, que é um dos mecanismos de endurecimento de aços Hadfield. A literatura sobre aços Hadfield indica que esse mecanismo de deformação é comumente encontrado em aços Hadfield com quantidades reduzidas de Mn, como nos aços Hadfield classe F da norma ASTM A128. Jost e Schmidt (1987) demonstram que aços Hadfield com quantidades inferiores a 10% de Mn apresentaram transformação martensítica induzida por deformação quando submetidos a ensaios de desgaste abrasivo e por deslizamento, enquanto os aços Hadfield com quantidades superiores as 12% de Mn não apresentaram transformação martensítica.

Em um trabalho mais recente, Tressia e Sinatora (2022) apontaram que a ocorrência de transformação martensítica em aço Hadfield com 12% de Mn para condições de maior severidade (maior força normal), enquanto para menores severidades o mecanismo de endurecimento predominante foi de maclação. A presença de martensita é muitas vezes indesejada em aços Hadfield por ser uma fase de maior fragilidade, onde as trincas podem propagar com maior velocidade e levar a peça a falhar em menor tempo.

No caso do componente analisado neste trabalho, a presença de martensita pode estar relacionada a menor quantidade de manganês encontrada, de aproximadamente 10%, o que corrobora com os resultados encontrados por Jost e Schmidt (1987). Esse resultado mostra a importância de controlar a composição química dos aços Hadfield. A estabilidade da austenita em aço Hadfield é garantida, especialmente, pelas quantidades de Mn e C. Aumentar a quantidade de Mn tende a aumentar a estabilidade da austenita, portanto, sugere-se que aços Hadfield para a aplicação descrita neste trabalho devem ter teores maiores de Mn, de modo a reduzir a propensão de formação de martensita.

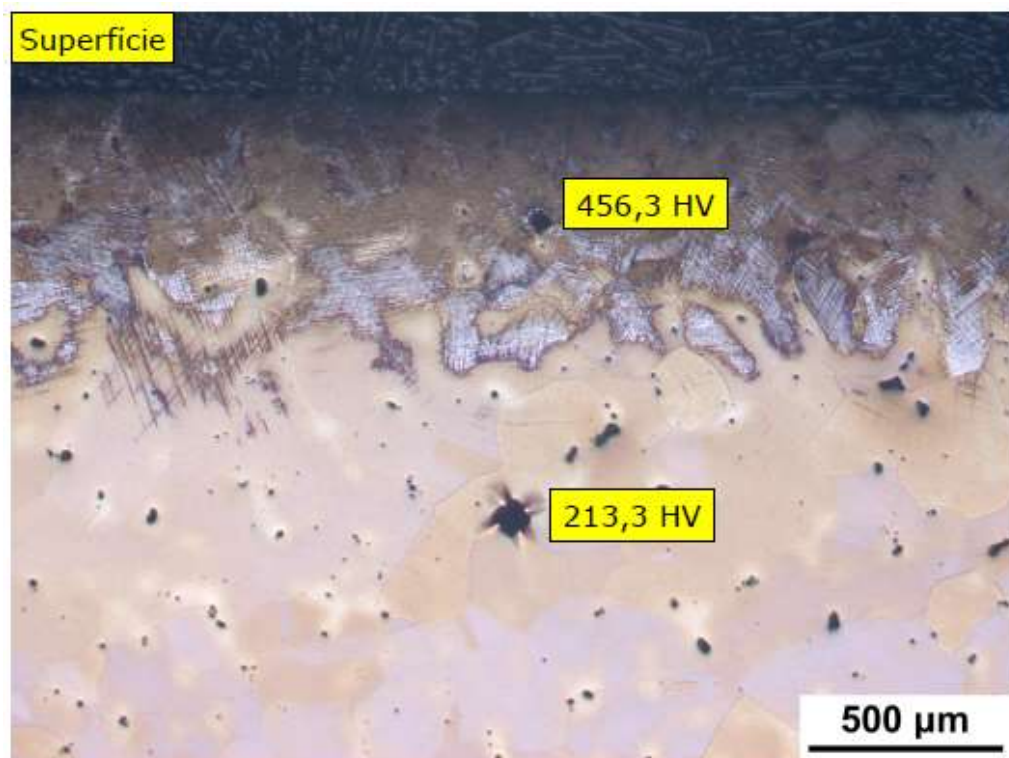
Sendo assim, será possível tratar essa problemática de duas formas: 1) restringir as quantidades de Mn em teores superiores a 11,5% (conforme norma ASTM A128) e em trabalhos futuros avaliar a presença de martensita; 2) avaliar em campo a aplicação de aços Hadfield com 18%Mn, para garantir maior estabilidade da austenita e avaliar a presença de martensita, e, se encontrada, quantificar e comparar os resultados com a liga padrão de 12%Mn e com a liga que falhou com 10%Mn.

Figura 22 – Metalografia óptica da amostra do MX, apresentando regiões de núcleo com defeitos.



Fonte: O autor.

Figura 23 – Metalografia da amostra MX, na região da superfície.



Fonte: O autor.

5.4.4 Ensaios de tração e impacto

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados dos ensaios de tração e de impacto respectivamente. Verifica-se que o revestimento de manto apresenta baixa resistência mecânica, em torno de 571MPa, porém boa ductilidade e tenacidade ao impacto, típicos dos aços manganês. Comparando aos resultados do aço Hadfield dentro da especificação

correta, verifica-se para o manto MX, que a energia de impacto é 7,9% menor, esse fato pode estar atrelado ao fato de o Mn estar abaixo do especificado para o ASTM A128 °C.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração.

Amostra	A(%)	RA(%)	S_e (MPa)	S_r (MPa)
Manto700h	12,8	17,4	398,1	571,5

Fonte: O autor.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de impacto, à temperatura ambiente.

Amostra	Energia (J)	Média
	86	
Manto700h	78	82
	82	

Fonte: O autor.

Os resultados de análise de falha, permitem destacar dois importantes aspectos sobre o material analisado:

O primeiro, trata-se da presença de microdefeitos encontrados predominantemente em contornos de grão, como mostrado na Figura 22. Esses defeitos, conforme discutido anteriormente, são regiões de maior propensão à nucleação e propagação de trincas, reduzindo assim a vida útil do componente. Tais defeitos podem ser minimizados com um correto projeto de fundição da peça e melhorias no processo de fundição.

O segundo, trata-se de uma camada superficial, com espessura de aproximadamente 600 µm, de martensita. Aços manganês austeníticos aplicados em britador devem apresentar microestrutura completamente austenítica, isenta de outras fases, como martensita, perlita e carbonetos. Essas fases, não garantem a tenacidade, a capacidade de deformação e de endurecimento requerido para a aplicação. Essa camada de martensita encontrada, provavelmente, está associada a transformação induzida por deformação. Aços manganês austeníticos (Hadfield) com teores mais elevados de Manganês, superior à 11%, apresentam elevada estabilidade da austenita e geralmente não sofrem transformação martensítica induzida por deformação (Tressia 2021; Jost e Schimdt 1987). Como a peça analisada apresentou teor de manganês da ordem de 10%, provavelmente, a transformação martensítica aconteceu devido à intensa deformação imposta naquela região e à reduzida estabilidade da austenita, comparado com uma peça com teores superiores a 11%, como no caso das amostras de Manto e Côncavo analisadas neste trabalho e que não apresentaram falhas.

Por tanto, em resumo, entende-se que a peça falhou mediante ao somatório de dois mecanismos: microdefeitos encontrados na microestrutura da peça e martensita induzida por deformação devido à quantidade reduzida de manganês da peça. Ambas as alterações contribuem para a fragilização da peça, redução da capacidade de deformação e para nucleação e propagação de trincas.

Atualmente, não existe uma especificação técnica de manto e côncavo para esses britadores, ficando a cargo do fornecedor enviar o material conforme pedido de compra que está vinculado a um código da peça e com uma especificação do fornecedor que não é compartilhada com o usuário, ou seja, tais defeitos ou composição química não podem ser questionados. Sendo assim, mediante a necessidade de evitar alguns defeitos, de controlar melhor a composição química e as propriedades dos materiais aplicados em revestimento de britador cônico, será proposto a seguir uma especificação técnica para compra de revestimentos de britadores.

5.5 Especificação técnica

A seguir, será proposta uma especificação técnica para compra de manto e côncavo de britador cônico, levando em considerações todas análises realizadas anteriormente.

5.5.1. Composição química

A peças fabricadas com aço Hadfield (aço manganês austenítico) deverão ter composição química conforme estipulado na Tabela 7. Além dos requisitos da norma ASTM A128 (2019) os teores de alumínio devem seguir o especificado, de modo a garantir que o metal líquido foi desoxidado corretamente.

Tabela 7 - Composição química de aço Hadfield (ASTM A 128 Grau B-2)

[%]							
Liga	C	Mn	Cr	Si	P	Al*	Fe
Padrão (B-2)	1,05- 1,20	12,0- 14,0	-	1,0 max	0,04 max	0,02- 0,05	Restante

18%Mn	1,05- 1,20	17,5- 18,5	-	1,0 max	0,04 max	0,02- 0,05	Restante
18%Mn- 2,5%Cr	1,05- 1,20	17,5- 18,5	2,0-2,5	1,0 max	0,04 max	0,02- 0,05	Restante

* Não especificado na ASTM A128.

** A Relação Mn/C deve ser maior que 10.

Fonte: O autor.

Deverá ser realizada pelo menos uma análise química por peça. Essa análise deverá ser realizada em corpo de prova apenso à peça e será realizada após tratamento térmico. Nesse mesmo corpo de prova deverá ser realizado o exame metalográfico como será descrito a seguir.

Os registros da análise química deverão apresentados no certificado de qualidade. Também deverá ser apresentado no “data book” (certificado de qualidade) a temperatura de início de vazamento das peças. Essa temperatura não deverá exceder 1510 °C.

5.5.2 Tratamento térmico

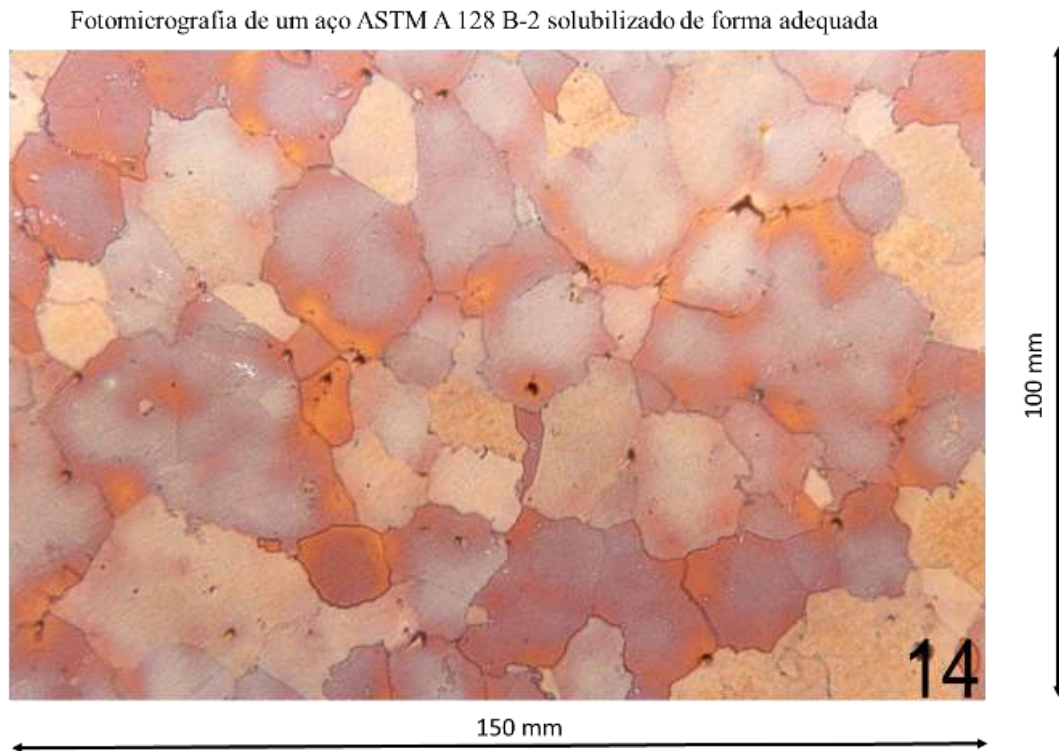
Todas as peças deverão ser submetidas a tratamento térmico de solubilização, que consiste no aquecimento da peça até a temperatura de tratamento e mantendo por tempo suficiente para a microestrutura seja totalmente austenítica e que os carbonetos ou outros precipitados estejam dissolvidos. A temperatura de solubilização deverá ser entre 1100 °C e 1150 °C. Imediatamente após a solubilização a peça deverá ser resfriada rapidamente em tanque de água com fluxo forçado, de modo que possibilite uma rápida extração de calor não ocorrendo reprecipitações e que a microestrutura ao longo de toda a seção da peça seja completamente austenítica isenta de carbonetos em contornos de grão.

A análise metalográfica deverá ser realizada por microscopia óptica e pelo menos duas fotomicrografias com aumento de 100 vezes deverão constar no certificado de qualidade. A análise metalográfica deverá ser realizada em corpo de prova apenso à peça, de modo a ser representativo. A microestrutura do material deverá ser austenítica, não sendo toleradas regiões com outras fases, como martensita, perlita, carbonetos, entre outras. Também não são tolerados defeitos do tipo trincas e rechupes.

A Figura 24 mostra fotomicrografias de aço ASTM A 128 (2019) Grau B-2 corretamente tratado e solubilizado a 1100 °C e a Figura 25 apresenta uma micrografia

da mesma peça sem tratamento térmico adequado. Na fotomicrografia com tratamento térmico inadequado percebe-se carbonetos dispersos tanto dentro dos grãos de austenita quanto nos contornos.

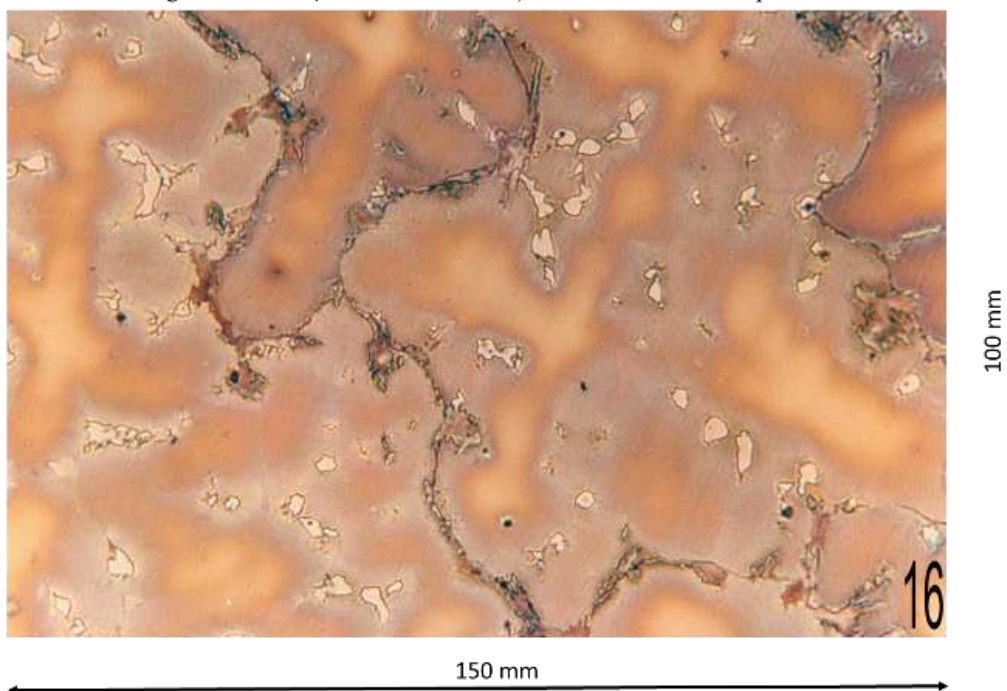
Figura 24. Micrografia de um aço Hadfield ASTM A128 B-2 após solubilização de forma adequada com microestrutura austenítica isenta de carbonetos.



Fonte: ASTM A128 B-2.

Figura 25 - Micrografia de um aço Hadfield ASTM A28 B-2 após solubilização de forma inadequada com microestrutura austenítica, porém com presença de carbonetos.

Fotomicrografia de um aço ASTM A 128 B-2) com tratamento inadequado



Fonte: ASTM A128 B-2.

Os registros de temperatura e tempo do tratamento térmico deverão ser fornecidos no “*data book*” para cada lote produzido, bem como as micrografias dos corpos de prova.

5.5.3 Propriedades Mecânicas

Após o tratamento térmico das peças, o corpo de prova retirado do apenso, deverá ser submetido a testes de tração, dureza e impacto e apresentar propriedades mecânicas conforme especificado na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas requeridas.

Dureza (HB)	Resistência ao Impacto (J)¹	Limite de escoamento (MPa)²	Limite de resistência à tração (MPa)²
200-280	Maior do que 110	320 a 380	700 a 1100

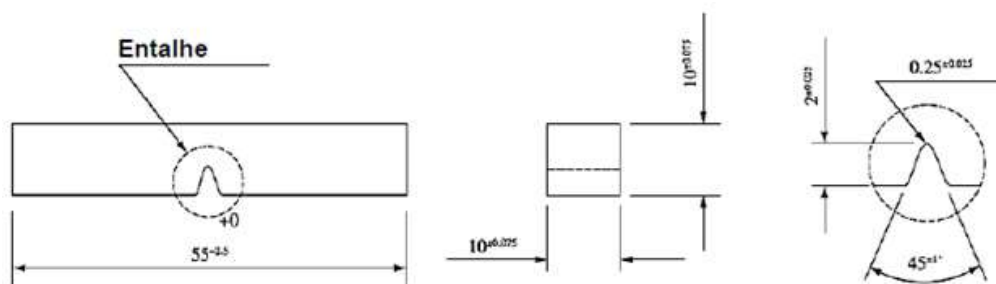
1: Ensaio Charpy com corpo de prova tipo A, segundo ASTM E23

2: Ensaio de tração conforme ASTM E8M

Fonte: O autor.

Ensaio Charpy devem ser empregados para avaliação da resistência ao impacto. Os ensaios devem ser realizados conforme estipulado pela norma ASTM E23 (2002) utilizando corpos de prova tipo A. Na Figura 26 é apresentada a geometria dos corpos de prova.

Figura 26 - Geometria dos corpos de prova para ensaio Charpy. Cotas em mm.



Fonte: ASTM E23 (2002).

Os ensaios de tração devem ser realizados conforme especificado na norma ASTM E8M.

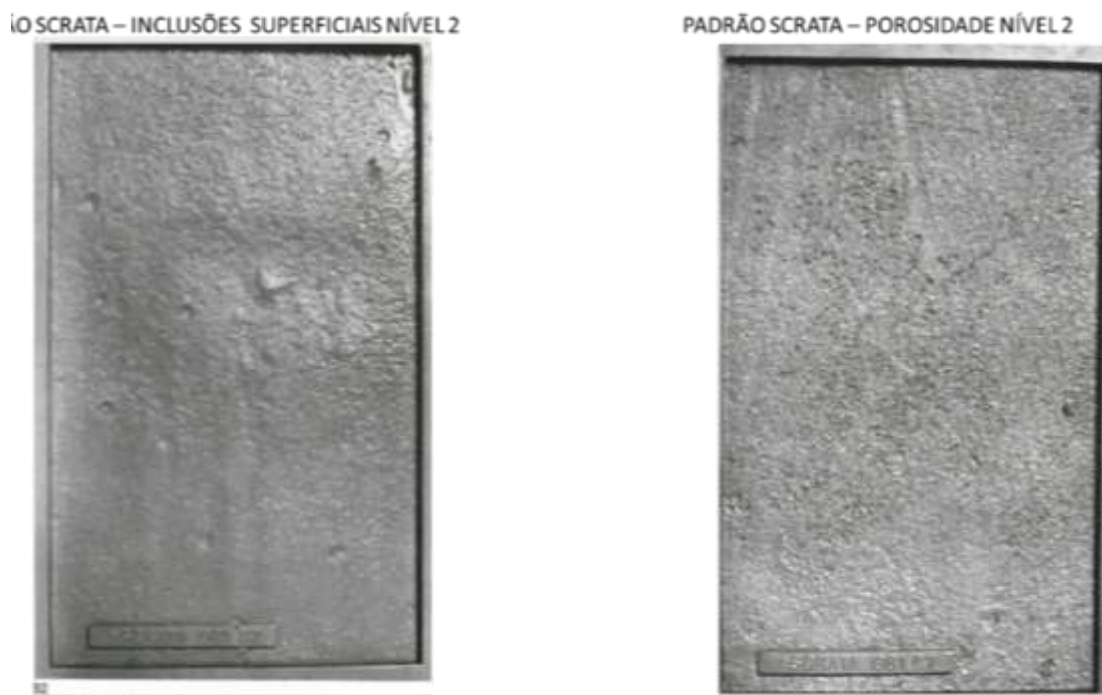
5.5.4 Sanidade e observações gerais

Para as regiões não usinadas, as peças deverão ser fornecidas conforme padrão SCRATA (ASTM A802, 2019) sendo eles:

- Rugosidade Superficial – A2 máximo;
- Inclusões Superficiais – B2 máximo;
- Gás – Porosidades – C2 Máximo;
- Dobras- D1 Máximo;
- Não serão aceitos rechupes e defeitos de contração acima do nível 2 de severidade da ASTM E 446-15.

Os furos das peças, se existentes, não podem ser alargados por corte com eletrodos ou pelo uso de maçaricos ou outros métodos que não preservem a microestrutura e a integridade das peças. Recomenda-se usinagem com lubrificação, com fresamento ou retífica cilíndrica.

Figura 27 - Padrão SCRATA para inclusões superficiais nível 2 (esquerda) e porosidade nível 2 (direita).



Fonte: ASTM A802 (2019).

Figura 28 - Padrão SCRATA para rugosidade superficial nível 2 (esquerda) e dobras nível 1 (direita).



Fonte: ASTM A802 (2019).

5.5.5 Data Book (Certificado De Qualidade)

O “*data book*” (certificado de qualidade) deverá ser entregue juntamente com as peças (versão física) e também versão digital. Deverá conter:

- Resultados de composição química;
- Resultados das microestruturas;
- Curvas de temperatura e tempo do tratamento térmico de solubilização. Gráfico de temperatura em função do tempo;
- Temperatura de vazamento do metal líquido;
- Resultados de propriedades mecânicas.

6 CONCLUSÃO

Verifica-se que o manto e o côncavo possuem diferentes taxas de desgaste o que influencia diretamente na vida útil das peças, sendo para o côncavo de 1444,89 horas e para o manto de 873 horas. Ambas as peças são confeccionadas em aço Hadfield (ASTM 128 grau C).

Observa-se nas imagens por estereoscopia que a superfície do manto após o fim de vida útil possui um aspecto de superfície característica de desgaste abrasivo, enquanto a do côncavo possui mais marcas de endentações e riscos, similares ao desgaste por impacto.

Pela análise de MEV foi possível observar que tanto o manto como o côncavo apresentam maclação como mecanismo de deformação predominante.

Pela análise de macrodureza não se pôde constatar o encruamento, porém pela microdureza é possível observar o aumento de dureza na superfície do manto e do côncavo, sendo deste último superior à do primeiro.

Após o fim de vida útil não se observou alterações significativas na resistência à abrasão das amostras de manto e côncavo. A amostra de côncavo possui uma maior resistência ao impacto, o que pode estar atrelado ao fato de o material ter encruado um pouco mais. Além disso comparou-se essas amostras com as de 18%Mn e 18%Mn+2,5%Cr, onde verifica-se resultados melhores para as ligas com maior teor de manganês.

Verificou-se peças que falharam antes desses tempos previstos estatisticamente, todavia essas peças possuíam falhas de fundição e não estavam conforme a especificação da ASTM A128 grau C. Há indícios de a peça ter falhado em função de microdefeitos encontrados na microestrutura da peça e pela formação de martensita induzida por deformação devido à quantidade reduzida de manganês da peça, fragilizando a peça.

Por fim, os resultados apresentados neste trabalho sugerem que as amostras de manto e côncavo sofrem encruamento e aumento da dureza superficial, todavia os esforços exigidos o manto que atua em movimento, faz com que a camada encruada seja constantemente retirada por desgaste abrasivo, dessa forma há uma maior taxa de desgaste e conseqüentemente uma vida útil menor.

REFERÊNCIAS

- ALBERTONI, Matheus Baptista. **Soldabilidade de aços Hadfield**. 2017.
- ANDRADE, Gustavo Tressia de. **Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores: efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ANDRADE, Gustavo Tressia de. **Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores: efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ASTM A128 / A128M-19. **Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- ASTM A802-19. **Standard Practice for Steel Castings, Surface Acceptance Standards, Visual Examination**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- ASTM-E23. **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**, 2016.
- AVERY, H. S. **Work Hardening in Relation to Abrasion Resistance**. In: Mater. Min. Ind. Symp., Vail, Colorado, 1974: pp. 43–78.
- BARRA, Sérgio Rodrigues; PINTAUDE, Giuseppe. **Materiais metálicos. Composição, fabricação, propriedades e desempenho. Sessão tribologia e engenharia de superfície. E-book**, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Giuseppe-Pintaude/publication/361684002_Revisao_sobre_terminologia_em_falhas_por_desgaste/links/62bf82350bf6950edea37031/Revisao-sobre-terminologia-em-falhas-por-desgaste.pdf>. Acesso em: 01/03/2023.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6ª edição. São Paulo: ABM, 1988
- COLPAERT, Hubertus et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Blucher, 2008.
- CORONADO MARIN, John Jairo. **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CORONADO MARIN, John Jairo. **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DIN 50320: **Verschleiß – “Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes”**. Beuth Verlag, Berlin 1979.

EYRE, T. S. Wear mechanisms. **Powder Metallurgy**, v. 24, n. 2, p. 57-63, 1981.

Gates, J.D. Two-body and three-body abrasion: a critical discussion. *Wear*, v.214, 1998, p.139-146. Avery, H.S. Classification and precision of abrasion tests, *Proc. Int. Conf. on Wear of Materials*, St. Louis, MO, 1977, ASME, New York, p. 148-157.

GAVA, Rodrigo Disner; PERUCH, Fábio; MARCELLO, Reginaldo Rosso. ANÁLISE DO DESGASTE POR ABRASÃO EM CAPAS DE DENTE FABRICADAS EM AÇO ASTM SC 1045 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO. **Ciência dos materiais**, 2019.

GOUSSELAND, P. Mines, metals and materials. In: **Symp. on Materials for the Mining Industry**. Climax Molybdenum Company Vail, CO, 1974. p. 7-10.

HAAKONSEN, F. **Optimizing of Strømhard austenitic manganese steel**, Norwegian University of Science and Technology, 2009.

HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, p. 263-284, 2017.

HULTHÉN, E. **Real – Time Optimization of Cone Crushers**. 2010. Tese de doutorado [Doctor of Philosophy in Product and Production Development] – Chalmers University of Technology, Göteborg.

KELLY, E. C.; SPOTTISWOOD, J. **Introduction to mineral processing**. New York: John Wiley, 1982.

LIMA GONTARSKI, Thiago de; CASALI, Rafael Machado; MIKOWSKI, Alexandre. Dureza vickers–definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 15736-15754, 2021.

MÁSCIA, Roberto. **Desenvolvimento e caracterização tribológica de materiais resistentes ao desgaste abrasivo para indústria mineradora de cassiterita**. 2002.

MEIRELES, Patrícia Gabrielly Macedo. **Controle de nível da câmara em britador cônico**. 2020.

MOREIRA, VINICIUS DA S.; EUZÉBIO, THIAGO AM. Modelagem e controle de abertura de câmara britadores cônicos. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2019.

MULAR, A. L.; BHAPPU, R. B. **Mineral Processing Plant Design**. Soc. Min. Eng. AIME. New York, 1980.

OBLAD, A. E. et al. Caracterização, cominuição e classificação de minérios, cap. 1. In: ANDRADE, V.L.L.; MASINI, E.; PERES, A.E.C.; VILLAS-BÔAS, R.C. **Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia in Memoriam Professor Paulo Abib Andery**. FUNDAÇÃO INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Recife, 399p., 1980.

OLIVEIRA, Cláudio Gonçalves de; SILVA, Ivete Peixoto Pinheiro. Os estudos tribológicos no ensino de Engenharia Mecânica. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 34, n. 2, 2015.

PRYOR, E.J. **Mineral Processing**, Ch. 5. London Applied Publishers Ltda, 1965.

SAMPAIO, João Alves; JUNIOR, Homero Delboni. Cominuição: Princípios da cominuição. CETEM. **Tratamento de minérios**. 6ª Edição. 2018. Disponível em <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2174/1/Tratamento%20de%20Min%C3%A9rios%206a%20edi%C3%A7%C3%A3o%20%28CAP.4.1%29.pdf>>. Acesso em 22/08/2022.

SANDVIK. Hidrocone: CH660 Instruções de instalação, manutenção e peças sobressalentes. Versão 1. Svedala, Suécia. **Sandvik SRP AB**. Set/2007. 689 páginas.

SCHROEDER, Renan Müller et al. **Desenvolvimento de aço hadfield sinterizado contendo partículas de grafita no volume**. 2015.

SILVEIRA, Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da. **Análise da britabilidade de minérios e previsão da capacidade de britadores cônicos**. 2009.

SINATORA, Amilton. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. 2005.

SPOTTISWOOD, K. **Introduction to Mineral Processing**. John Wiley and Sons, 1982.

TRESSIA, G. **Especificação química, microestrutural e de propriedades mecânicas para aços austeníticos manganês com alto Mn para britadores/ Ouro Preto, MG: ITV, 2021, PROD. TEC. ITV MI - N004/2021.**

TRESSIA, GUSTAVO; SINATORA, AMILTON. Effect of the normal load on the sliding wear behavior of Hadfield steels. **WEAR JCR**, v. 520, p. 204657, 2023.

TYLCZAK, Joseph H. Abrasive wear. **ASM Handbook 18, Friction, Lubrication and Wear Technology**, p. 184-190, 1992.

VARELA, J. J. Desenvolvimento e aplicação de britadores primários para minério de ferro. In: **Anais XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology**, Goiânia-GO. 2013.

VARELA, Luis Bernardo et al. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur. **Engineering Failure Analysis**, v. 122, p. 105295, 2021.

VENTURELLI, Bianka Nani. **Efeito do refino do tamanho de grão pela adição de Hf nas propriedades mecânicas de tração e impacto do aço Hadfield**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Zhu, W. T., Guo, L. C., Shi, L. B., Cai, Z. B., Li, Q. L., Liu, Q. Y., & Wang, W. J., 2018. "Wear and damage transitions of two kinds of wheel materials in the rolling-sliding contact", **Wear**, Vol. 398-399, pp. 79-89.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier, 1987.

