

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

EFEITO DA VARIAÇÃO NOS TEORES DE CROMO, TITÂNIO E NIÓBIO NO
DESEMPENHO DO DESGASTE ABRASIVO DE LIGAS DE FERRO FUNDIDO
BRANCO ALTO CROMO

Nicolas Kniphoff Jandrey

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Jandrey, Nicolas Kniphoff
EFEITO DA VARIAÇÃO NOS TEORES DE CROMO, TITÂNIO E
NIÓBIO NO DESEMPENHO DO DESGASTE ABRASIVO DE LIGAS DE
FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO / Nicolas Kniphoff
Jandrey. -- 2024.
41 f.
Orientador: Vinicius Karlinski de Barcellos.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Ferro Fundido Branco Alto Cromo. 2. Nióbio. 3.
Titânio. 4. Desgaste Abrasivo. I. Barcellos, Vinicius
Karlinski de, orient. II. Título.

Dedico esta dissertação à minha família, que sempre esteve torcendo por cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar minha profunda gratidão aos meus pais, verdadeiros exemplos de caráter e dedicação. Agradeço pelo apoio constante, pelos conselhos oportunos, pelas orações diárias e por toda a generosa ajuda que sempre me oferecem.

Um especial agradecimento à empresa Ecoplan Aços Especiais, pela significativa contribuição, além do apoio e incentivo que foram essenciais para transformar este projeto em realidade.

Ao Engenheiro Metalúrgico Jorge Augusto Carvalho, que sempre foi um guia valioso ao longo do meu progresso nesta área de atuação.

Aos colegas de trabalho que me encorajaram e colaboraram ativamente na execução deste trabalho.

Minha gratidão à minha irmã Kamila, um exemplo notável de força, perseverança e carinho, que desempenhou um papel fundamental na elaboração deste trabalho.

Aos colegas de turma, com quem compartilhei conhecimentos, desafios, preocupações e sucessos.

Expresso meu reconhecimento ao Professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos pela orientação dedicada na realização deste trabalho.

Agradeço aos colaboradores dos laboratórios LAFUN e LdTM, em particular a Regis Fabiano do Amaral, Igor Zimpel e João Vitor Piovesan Dalla Nora, pela assistência valiosa nos ensaios realizados.

Aos amigos, em especial Guipysom, pela parceria constante durante os momentos difíceis e pelos momentos de lazer.

Ao esporte, que me proporcionou saúde e qualidade de vida, sendo fundamental para manter meu foco e disciplina até o final.

Registro meu sincero agradecimento a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Desgaste.....	13
2.2 Desgaste Abrasivo.....	13
2.3 Ferro Fundido Branco.....	14
2.4 Resistência ao desgaste.....	14
2.5 Ferro Fundido Branco Alto Cromo (FFBACr).....	15
2.6 Tratamento Térmico.....	19
2.7 Elementos de Liga.....	19
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	22
3.1 Materiais e Métodos.....	23
3.1.1 Material.....	23
3.1.2 Análise Química.....	23
3.1.3 Análise Metalográfica.....	24
3.1.4 Ensaio de Dureza.....	24
3.1.5 Ensaio de Impacto.....	24
3.1.6 Ensaio Roda de Borracha.....	24
3.1.7 Ensaio de Microdureza.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1 Composições Químicas.....	26
4.2 Caracterização Microestrutural.....	26
4.3 Ensaio de Desgaste.....	29
4.4 Ensaio de Dureza Rockwell C.....	32
4.5 Ensaio de Microdureza Vickers.....	33
4.6 Ensaio de Impacto Charpy.....	34
5 CONCLUSÕES.....	35
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	36
REFERÊNCIAS.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama metaestável C-Cr-Fe.....	16
Figura 2.2	Regiões onde as ligas ASTM A532 se encontram no diagrama Fe-C-Cr.....	17
Figura 3.1	Fluxograma das etapas de pesquisa.....	22
Figura 4.1	Microestruturas da liga 18Cr	26
Figura 4.2	Microestruturas da liga 25Cr-Ti	26
Figura 4.3	Microestruturas da liga 25Cr-Nb.....	27
Figura 4.4	Resultado do volume médio perdido no ensaio de desgaste abrasivo.....	29
Figura 4.5	Desgaste nas superfícies dos corpos de prova.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Faixa de composição química das ligas segundo norma ASTM A532 (% em peso)	15
Tabela 4.1	Resultado da Composição química dos FFBAcr produzidos (% em peso)	24
Tabela 4.3	Resultados obtidos no ensaio Roda de Borracha.....	28
Tabela 4.4	Resultados obtidos no ensaio de dureza.....	30
Tabela 4.5	Resultados obtidos no ensaio de microdureza.....	32
Tabela 4.6	Resultados obtidos no ensaio Charpy.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
DIN	Deutsches Institut Für Normung;
δ	Delta (fase ferrita);
FFBACr	Ferro fundido branco alto cromo;
γ	Gama (fase austenita);
HRC	Dureza Rockwell C;
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo;
LAFUN	Laboratório de Fundição;
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica;
M	Metal de interesse;
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
VPA	Volume perdido ajustado;

RESUMO

A pesquisa conduzida focalizou a produção de ligas de ferro fundido branco de alto cromo por processo de fundição, utilizando um forno à indução e moldes de areia e resina fenólica. O estudo visou analisar o impacto da adição de cromo, nióbio e titânio nas propriedades mecânicas destas ligas. O processo incluiu tratamentos térmicos, como têmpera e revenimento. Além disso, foram conduzidos ensaios de dureza, ensaio de impacto Charpy e ensaios de desgaste abrasivo por roda de borracha, buscando avaliar a resistência ao desgaste e a tenacidade das ligas. Os resultados destacaram a influência das adições de cromo, nióbio e titânio nas composições químicas das ligas. As imagens microestruturais revelaram a presença de carbonetos, principalmente do tipo Cr_7C_3 , e a formação de carbonetos específicos de nióbio e titânio, contribuindo para o refinamento da microestrutura dos grãos. A análise de desgaste abrasivo indicou um desempenho superior na liga 25Cr-Nb, evidenciando uma notável redução na perda de volume em comparação com outras composições. Embora tenha ocorrido uma diminuição na tenacidade nas ligas contendo titânio e nióbio, a resistência ao desgaste microabrasivo foi aprimorada. Em síntese, a pesquisa concluiu que a liga 25Cr-Nb demonstrou o melhor desempenho global, destacando-se não apenas pela resistência ao desgaste, mas também pela interação complexa entre os elementos na microestrutura. O estudo ressalta a importância de uma análise abrangente, considerando não apenas a dureza, mas também a microestrutura e a presença de carbonetos ao avaliar as propriedades das ligas em aplicações sujeitas ao desgaste abrasivo. Essas descobertas têm implicações significativas para o desenvolvimento de ligas de ferro fundido branco de alto cromo com desempenho aprimorado em ambientes de desgaste.

Palavras-chave: Ferro fundido branco alto cromo. Desgaste abrasivo. ASTM A532. Nióbio. Titânio.

ABSTRACT

The conducted research focused on the production of high-chromium white cast iron alloys through a casting process, using an induction furnace and sand and phenolic resin molds. The study aimed to analyze the impact of the addition of chromium, niobium, and titanium on the properties of these alloys. The process included heat treatments such as hardened and stress relieved to optimize the mechanical properties of the alloys. Additionally, hardness tests, Charpy impact tests, and abrasive wear tests using a rubber wheel were conducted to assess the wear resistance and toughness of the alloys. The results highlighted the influence of chromium, niobium, and titanium additions on the chemical compositions of the alloys. Microstructural images revealed the presence of carbides, mainly of the Cr₇C₃ type, and the formation of niobium and titanium-specific carbides, contributing to the refinement of the grain microstructure. Abrasive wear analysis indicated superior performance in the 25Cr-Nb alloy, showing a notable reduction in volume loss compared to other compositions. Although a decrease in toughness occurred in alloys containing titanium and niobium, microabrasive wear resistance was enhanced. In summary, the research concluded that the 25Cr-Nb alloy demonstrated the best overall performance, standing out not only for wear resistance but also for the complex interaction between elements in the microstructure. The study emphasizes the importance of a comprehensive analysis, considering not only hardness but also microstructure and the presence of carbides when evaluating the properties of alloys in applications subject to abrasive wear. These findings have significant implications for the development of high-chromium white cast iron alloys with improved performance in abrasive wear environments.

Key words: High chromium white cast iron. Abrasive wear. ASTM A532. Niobium. Titanium.

1 INTRODUÇÃO

O desgaste é um fenômeno que se manifesta pela perda gradual de massa em uma superfície que está em movimento relativo em relação a outra, sob uma carga. É essencial observar que o desgaste não é apenas uma característica do material, mas uma resposta do sistema como um todo. Abordagens específicas são necessárias para lidar com diferentes formas de desgaste, como destacado por Raymond (2004).

Eyre (1976) aponta que metade dos desafios relacionados ao desgaste na indústria é associada ao desgaste abrasivo, seguido pelo desgaste adesivo. Em determinadas circunstâncias, a natureza do desgaste pode alterar-se, ou múltiplos mecanismos podem operar simultaneamente. Portanto, é crucial compreender as necessidades específicas de cada aplicação, selecionar o material mais apropriado para cada ambiente e trabalhar para melhorar a resistência ao desgaste, considerando outras propriedades importantes, como tenacidade à fratura e resistência à corrosão, dependendo da aplicação.

Os ferros fundidos brancos alto cromo (FFBACr) desempenham uma função crucial na produção de componentes, especialmente em setores envolvendo mineração, nos quais a resistência ao desgaste abrasivo é essencial. Em relação a esses materiais, parâmetros microestruturais fundamentais que impactam na resistência ao desgaste abrangem a matriz, a dureza, a quantidade, a orientação e a forma dos carbonetos. Os ferros fundidos brancos alto cromo (FFBACr) são utilizados em diversas indústrias, incluindo fabricação de cilindros de laminação a quente, usinas de energia térmica, mineração, moagem, cimento, siderurgia e na produção de componentes para máquinas agrícolas (TABRETT; SARE; GHOMASHCHI, 1996).

Pesquisas têm se voltado para estratégias alternativas visando atingir uma ótima combinação entre dureza e tenacidade à fratura nos ferros fundidos brancos alto cromo (FFBACr), por meio da alteração da morfologia, tamanho e distribuição de carbonetos. Modificações na composição, aliadas a tratamentos térmicos adequados, são consideradas opções viáveis para aprimorar as propriedades desses materiais (PENAGOS, 2017).

Investigações apontam que a inclusão de elementos de liga que se transformam em carbonetos, como nióbio e titânio, em ligas de ferros fundidos brancos alto cromo (FFBACr), tem a tendência de diminuir a quantidade de carbonetos do tipo M7C3. Isso geralmente resulta

em um aumento da resistência ao desgaste devido à formação de carbonetos de nióbio (NbC) ou titânio (TiC), além do refinamento da estrutura. A maioria dos estudos que investigam o acréscimo de nióbio se concentra em quantidades inferiores a 3% (IBRAHIM; EL-HADAD; MOURAD, 2017).

O propósito deste estudo é analisar o efeito no desgaste abrasivo pela incorporação de nióbio, titânio e cromo em ligas de ferro fundido branco alto cromo, submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. A análise microestrutural foi realizada por meio de microscopia óptica, enquanto a caracterização mecânica incluiu a realização de ensaios mecânicos para determinação de propriedades relacionadas a dureza do material, resistência ao impacto, e resistência ao desgaste abrasivo utilizando uma roda de borracha (ASTM G65).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desgaste

O desgaste é um fenômeno que se caracteriza pela perda gradual de massa em uma superfície em movimento relativo em relação a outra, sob uma carga. É fundamental destacar que o desgaste não se limita apenas às propriedades do material, mas representa uma resposta do sistema como um todo. Abordagens específicas são necessárias para lidar com diferentes formas de desgaste, conforme mencionado por Raymond (2004). A norma DIN 50320 (1997) categoriza um sistema tribológico em quatro ações principais: abrasão, adesão, fadiga superficial e ações químicas, sendo a abrasão a forma mais comum de remoção progressiva de material.

A norma ASTM G40 (2015) define desgaste como a alteração de uma superfície sólida devido ao deslocamento relativo entre superfície e elemento de contato. Os efeitos econômicos do desgaste enfatizam a relevância dos princípios tribológicos. Isso se traduz em estratégias para aumentar o tempo de utilização dos componentes, reduzir o valor gasto em manutenção e reposição, evitar paradas excessivas e otimizar investimentos ao estender a vida útil do maquinário (NOBLE, 1985).

Nos materiais frágeis, o desgaste ocorre por meio de fraturas frágeis. Esse processo envolve a indentação de uma partícula dura na superfície do material, gerando trincas e remoção progressiva de material. A geometria e tamanho das partículas desempenham um papel crucial na abrasividade, com partículas que apresentam ângulos agudos demonstrando maior propensão ao desgaste do que as partículas esféricas. Em geral, o desgaste resulta na perda ou deslocamento gradual de material devido ao movimento relativo entre superfícies, afetando a geometria e dimensões dos componentes (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A compreensão do comportamento dos materiais em diversas condições de desgaste é essencial para o avanço de tecnologias e a minimização de prejuízos. Esse entendimento possibilita a implementação de estratégias mais eficazes para lidar com as diversas formas de desgaste, contribuindo para o avanço na eficiência e durabilidade de materiais e componentes (RABINOWICZ, 1984).

2.2 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser dividido em duas ou três categorias, dependendo da quantidade de corpos no sistema. No caso da abrasão de dois corpos, uma superfície de maior dureza desliza sobre uma menos dura, e isso também ocorre quando componentes abrasivos aderem a um dos corpos. Já na abrasão de três corpos, os componentes abrasivos atuam como elementos de interface, deslizando livremente entre as superfícies e causando danos. Um exemplo típico de abrasão de três corpos é observado em processos como mineração, como nas pontas de uma escavadeira, sendo caracterizado por sua relativa falta de controle devido à

diversidade de materiais mais duros presentes nos materiais retirados do solo (NORTON, 2013; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Existem diversos métodos disponíveis para a avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de materiais. Esses métodos incluem testes como o uso da roda de borracha, de acordo com a norma ASTM G65 (2016), e pino sobre disco, de acordo com a norma ASTM G132 (1996).

Stachowiak e Batchelor (2005) destacam que, por um longo período, os mecanismos de desgaste abrasivo de dois e três corpos eram considerados análogos e tratados de maneira similar. No entanto, foram identificadas diferenças substanciais entre esses dois sistemas. O processo de desgaste abrasivo de dois corpos resulta em uma taxa de desgaste 10 vezes maior do que o processo de três corpos, devido à introdução de outros mecanismos de desgaste, como o adesivo, e ao seu comportamento semelhante ao mecanismo de corte.

A dureza e microestrutura da superfície, a velocidade de deslizamento e a tensão de compressão, a geometria e dureza da partícula abrasiva estão diretamente relacionadas à razão para o desgaste. A abrasão, caracterizada por sua rapidez e severidade, é comum nos setores mineral e agrícola, tornando crucial o estudo desses processos, especialmente em países como o Brasil (NORTON, 2013).

2.3 Ferro Fundido Branco

As ligas de Fe-C conhecidas como ferros fundidos brancos são constituídas por processos de solidificação e transformação de fase que seguem as diretrizes estabelecidas no diagrama metaestável Fe-C. Essencialmente, essas composições são predominantemente compostas por perlita e cementita (BARREIRO, 1963). Em todos os ferros fundidos brancos, a integralidade do carbono está presente na forma de carbonetos de ferro Fe₃C (cementita), o que resulta em uma superfície de fratura com aspecto claro. A designação "brancos" é atribuída devido às tonalidades esbranquiçadas observadas em suas superfícies fraturadas, resultado da presença quase exclusiva de carbonetos em contraposição à grafita que não está presente. As propriedades essenciais desses materiais, derivadas da alta concentração de cementita, incluem sua notável dureza e resistência ao desgaste, conforme destacado por Chiaverini (1977).

2.4 Resistência ao desgaste

Vários elementos influenciam a conduta tribológica dos materiais. Conforme afirmado por Archard (1953), a resistência ao desgaste aumenta proporcionalmente à dureza do material. Assim, é esperado que o aumento na quantidade de carbonetos duros contribua para um melhor desempenho na resistência ao desgaste. No entanto, o comportamento legítimo é afetado por diversos fatores microestruturais, como orientação, distribuição e morfologia de carbonetos, tipos e tamanhos de abrasivos, além dos sistemas e mecanismos de desgaste empregados. (TABRETT; SARE; GHOMASHCHI, 1996; CORONADO, 2011).

Os ferros fundidos brancos hipoeutéticos, caracterizados por possuírem entre 20 e 35% de sua microestrutura composta por carbonetos eutéticos, demonstram boa resistência à abrasão devido à elevada fração de carbonetos. Contudo, essa resistência está condicionada à presença de matrizes austeníticas, martensíticas ou uma combinação de ambas, que oferecem suporte adequado aos carbonetos. Em circunstâncias particulares, a matriz austenítica pode demonstrar um desempenho superior em relação ao desgaste abrasivo devido ao seu encruamento. Em contrapartida, as matrizes perlíticas e ferríticas oferecem suporte mecânico menos eficaz aos carbonetos, o que resulta na diminuição da resistência ao desgaste abrasivo (ZHANG; KELLY; GATES, 2001; CORONADO; SINATORA, 2009).

Inicialmente, acreditava-se que a dureza do material era o único fator determinante para a resistência ao desgaste, ou seja, quanto maior a dureza, maior seria a resistência ao desgaste. No entanto, compreende-se atualmente que diversos fatores influenciam a resistência ao desgaste abrasivo de um material. A microestrutura da liga desempenha um papel crucial nesse contexto dentro de um sistema tribológico específico. No caso dos ferros fundidos brancos alto cromo, vários elementos, como a rota de processamento, o tratamento térmico e a adição de elementos de liga, podem alterar significativamente essa microestrutura (PACHECO, 2018).

2.5 Ferro Fundido Branco Alto Cromo (FFBACr)

Os ferros fundidos brancos alto Cromo (FFBACr) são notáveis por sua resistência à abrasão, consistindo principalmente em ligas de ferro, cromo e carbono. O teor de carbono varia de 1,8% a 3,6% em massa, enquanto o cromo situa-se entre 12% e 30%. Além disso, podem conter fósforo, enxofre e silício originados das matérias-primas, além de elementos adicionais como cobre, níquel, manganês e/ou molibdênio. A estrutura da matriz, a presença de carbonetos de segunda ordem incorporados na matriz e o conteúdo de carbonetos eutéticos são fatores que influenciam diretamente as propriedades mecânicas desses ferros fundidos. A microestrutura é predominantemente composta por carbonetos do tipo M_7C_3 , conhecidos por sua elevada dureza, superior à da matriz austenítica ou martensítica. (INTHIDECH; MATSUBARA, 2008; BEDOLLA-JACUINDE et al., 2007; GUITAR et al., 2018).

Estudos de Sawamoto, Ôgi e Matsuda (1986) e de Baik e Loper Jr. (1988) corroboraram a presença de carbonetos M_7C_3 na matriz dos ferros fundidos brancos alto cromo. Esses carbonetos, na forma de bastões rígidos e interrompidos, demonstram maior tenacidade e resistência ao impacto em contraste com os ferros fundidos de baixo cromo, que possuem carbonetos M_3C duros e contínuos.

Conforme estabelecido pela norma ASTM A532 (2019), os FFBACr são classificados em três graus de classe e quatro graus de tipo, variando de acordo com os teores de carbono e cromo. Variações secundárias em outros elementos de liga, como molibdênio, níquel, manganês e silício, também são consideradas, conforme indicado na Tabela 2.1. Composições hipoeutéticas, descritas nos grupos II e III, são predominantes na indústria (GUITAR et al., 2018).

Tabela 2.1 Faixa de composição química das ligas segundo norma ASTM A532 (% em massa).

Classe	Tipo	Designação	Carbono	Manganês máx	Silício	Níquel	Cromo	Molibdênio máx	Cobre máx	Fósforo máx	Enxofre máx
I	A	Ni-Cr-Hc	2,8-3,6	2,0	0,8 máx	3,3-5,0	1,4-4,0	1,0	...	0,3	0,15
I	B	Ni-Cr-Lc	2,4-3,0	2,0	0,8 máx	3,3-5,0	1,4-4,0	1,0	...	0,3	0,15
I	C	Ni-Cr-GB	2,5-3,7	2,0	0,8 máx	4,0 máx	1,0-2,5	1,0	...	0,3	0,15
I	D	Ni-HiCr	2,5-3,6	2,0	2,0 máx	4,5-7,0	7,0-11,0	1,5	...	0,10	0,15
II	A	12% Cr	2,0-3,3	2,0	1,5 máx	2,5 máx	11,0-14,0	3,0	1,2 máx	0,10	0,06
II	B	15% Cr-Mo	2,0-3,3	2,0	1,5 máx	2,5 máx	14,0-18,0	3,0	1,2 máx	0,10	0,06
II	D	20% Cr-Mo	2,0-3,3	2,0	1,0-2,2	2,5 máx	18,0-23,0	3,0	1,2 máx	0,10	0,06
III	A	25% Cr	2,0-3,3	2,0	1,5 máx	2,5 máx	23,0-30,0	3,0	1,2 máx	0,10	0,06

Fonte: ASTM A532 (2019).

A classe II dos ferros fundidos brancos alto cromo refere-se àqueles que contêm cromo-molibdênio, com teor de até 3% de Mo e de 11 a 23% de Cr. Essa classe é reconhecida por ser a mais dura entre todas as classes de FFBAcr e pode passar por tratamento térmico para atingir máxima resistência à abrasão e tenacidade. Por outro lado, os FFBAcr da classe III são frequentemente utilizados para fins gerais, especialmente quando é necessária uma determinada resistência à corrosão. Nesse contexto, a quantidade de cromo geralmente varia de 23 a 30% em peso, com até 3% de Mo. (TANG et al., 2011; LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2018).

A microestrutura do FFBAcr pode se apresentar como hipoeutética, eutética ou hipereutética, dependendo do teor de carbono e dos elementos de liga adicionados. As ligas hipoeutéticas de FFBAcr (10 a 30% de Cr, 2 a 3,5% de C) têm sido extensivamente estudadas graças à sua combinação que proporciona resistência satisfatória à abrasão e corrosão (TABRETT, SARE; GHOMASHCHI, 1996).

Um diagrama ternário metaestável Fe-Cr-C das temperaturas *liquidus* foi construído por Thorpe e Chicco (1985), representando na Figura 2.1. As regiões do diagrama ricas em Fe governam o comportamento de solidificação de 95% dos FFBAcr comercializados atualmente, conforme Neto (2021). Os carbonetos M3C, M7C3, e as fases γ (austenita) e δ (ferrita) são representados em quatro regiões distintas do diagrama metaestável Fe-Cr-C (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2018).

Ligas com composição química situada na região da fase austenítica (γ) solidificam-se como ligas hipoeutéticas, ao passo que aquelas sobrepondo a linha U1 e U2 solidificam-se como ligas eutéticas. Por sua vez, ligas dentro da região M7C3 solidificam-se como ligas hipereutéticas (CHUNG et al., 2013; THORPE; CHICCO, 1985).

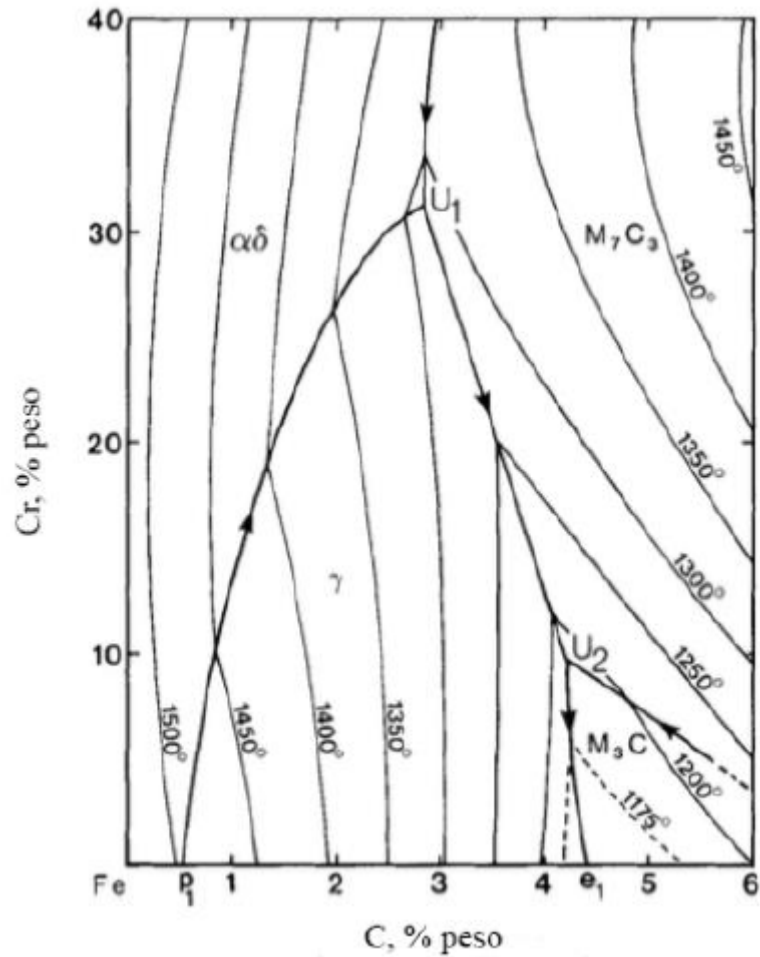


Figura 2.1 Diagrama C-Cr-Fe.

Fonte: Thorpe e Chicco (1985).

Na maior parte dos casos, os FFBA_{Cr} comercialmente resistentes à abrasão solidificam-se na região da austenita. A Figura 2.2 ilustra os FFBA_{Cr} que estão dentro dos padrões estabelecidos pela norma ASTM A532 (2019). Conforme evidenciado na Figura 2.2, todos os FFBA_{Cr} mencionados na norma são hipoeutéticos, conforme destacado por Laird, Gundlach e Röhrig (2018).

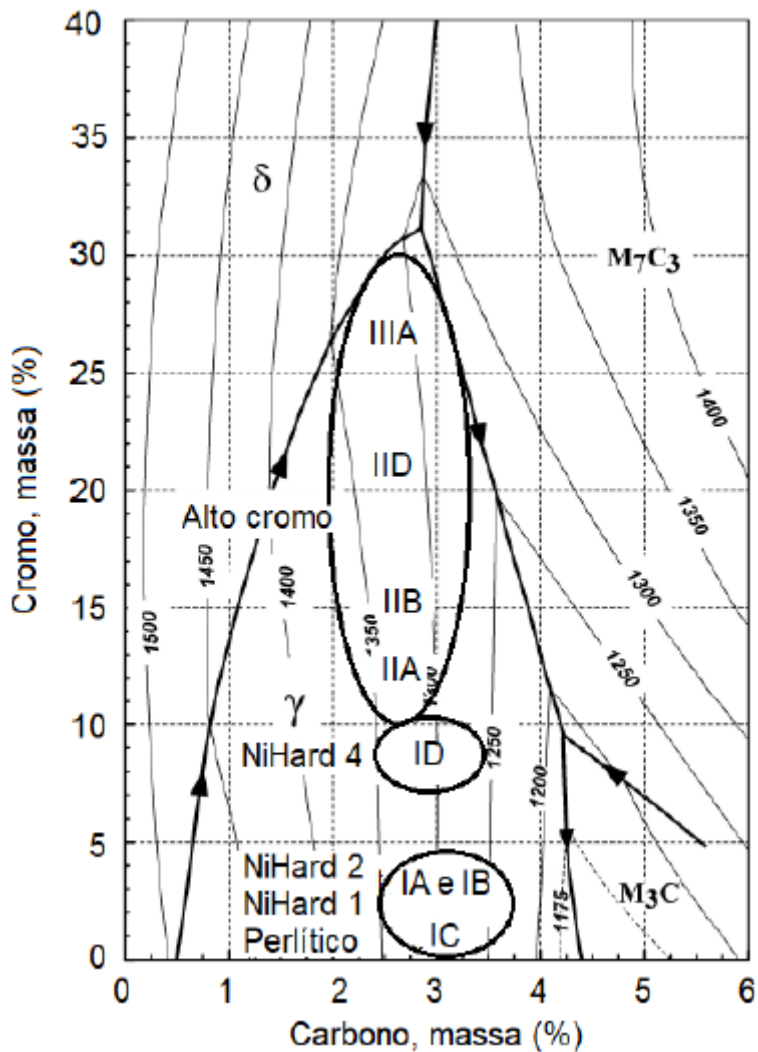


Figura 2.2 Regiões onde as ligas ASTM A532 se encontram no diagrama.

Fonte: Neto (2021) adaptado de Laird, Gundlach e Röhrig (2018).

Estudos recentes têm se concentrado em ligas hipereutéticas de FFBA₂Cr, pois apresentam uma matriz com dureza considerada alta e regiões extensas de carbonetos M₇C₃, tornando-as ideais para aplicações como revestimento duro. Segundo Sinatora, Albertin e Matsubara (1996), entre 1400 e 2000 HV, os carbonetos de cromo, como o M₇C₃, podem atingir uma considerável dureza. No entanto, esses mesmos carbonetos, responsáveis pela elevada dureza, comprometem a resistência ao impacto da matriz (IBRAHIM; EL-HADAD; MOURAD, 2017).

Maratray e Usseglio-Nanot (1970) observaram que a resistência à abrasão pode ser aumentada devido à elevada dureza do carboneto M₇C₃. Destacaram a importância de uma matriz dura para segurar os carbonetos, prevenindo deslocamentos, deformações ou fraturas. Essas ligas de ferros fundidos brancos alto cromo são amplamente utilizadas em diversas indústrias, como mineração e martelos de moendas de cana. Nestas aplicações, o desgaste abrasivo é uma preocupação constante, resultando em altos custos de manutenção e reparos.

As aplicações industriais dos ferros fundidos brancos alto cromo são, em geral, limitadas devido à sua baixa tenacidade, apesar do aumento da resistência à abrasão com o aumento da dureza do material. A influência direta sobre a resistência ao desgaste abrasivo dessas ligas é significativamente determinada por parâmetros microestruturais, tais como a quantidade e morfologia de carbonetos, a quantidade de austenita retida, entalhes internos e a estrutura da matriz, além da dureza (ZUM-GAHR; DOANE, 1980).

A aplicação de ligas hipereutéticas de FFBA₂Cr em ambientes propensos ao desgaste abrasivo e impacto pode ser viabilizada por meio de tratamentos térmicos. Esses procedimentos visam alcançar uma matriz martensítica controlada. A adição de elementos de liga também é uma estratégia, visando refinar os carbonetos primários e reduzir a fragilidade microestrutural. A incorporação de elementos de liga, como nióbio, titânio e vanádio, não só modifica e controla a morfologia dos carbonetos, mas também tem um efeito adicional, refinando a microestrutura da liga (TABRETT; SARE, 1998).

2.6 Tratamento Térmico

Na condição bruta de fusão, as ligas de FFBA₂Cr solidificam-se principalmente com uma matriz austenítica, além de carbonetos eutéticos nas áreas interdendríticas, enriquecida com cromo, carbono e possíveis elementos de liga. A possibilidade de alteração significativa dessa microestrutura primária é viabilizada por meio de tratamento térmico, que tem como principais objetivos a precipitação de carbonetos secundários e a transformação martensítica da matriz (LAIRD; GUNDLACH; ROHRIG, 2018; WIENGMON et al., 2005; KARANTZALIS; LEKATOU; DIAVATI, 2009).

O tratamento térmico de têmpera, comumente empregado, é realizado em temperaturas de austenitização entre 800 °C e 1100 °C e, conforme a espessura da peça, durante 1 a 6 horas (EFREMENKO; SHIMIZU; CHABAK, 2013). Depois segue pelo processo de revenimento simples ou duplo. Esse procedimento tem a finalidade de reverter a martensita e transformar a maior quantidade possível da austenita retida. Embora os FFBA₂Cr possam ser utilizados sem revenimento, é recomendável aplicar o tratamento térmico de revenimento. Isso ocorre em uma faixa de temperatura entre 200 °C e 650 °C, com duração de até 12 horas, visando restaurar tenacidade na matriz martensítica. A presença de 10% a 30% de austenita retida é resultado da microestrutura após o tratamento de têmpera. Parte dessa austenita retida será modificada em temperaturas baixas durante o revenimento, mas podem surgir problemas de lascamento. Portanto, é necessário aumentar a temperatura para diminuir a quantidade de austenita retida (KARANTZALI; LEKATOU; DIAVATI, 2009; LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2018; TABRETT; SARE; GHOMASHCHI, 1996).

2.7 Elementos de Liga

Segundo Fagundes (2015), materiais contendo carbonetos de cromo são amplamente empregados para combater o desgaste em peças de máquinas, sendo escolhidos não apenas pela alta dureza alcançada pelos carbonetos, mas também devido ao custo acessível desse componente.

O cromo adicionado aos FFBAcr desempenha um papel crucial na formação de carbonetos, parte dos quais se dissolve na matriz, proporcionando, em elevadas temperaturas, resistência à oxidação. Para aprimorar a temperabilidade e evitar a formação de perlita, é comum introduzir outros elementos de liga, como Cu, Mn e Ni. A quantidade adequada desses elementos é vital, pois quantidades muito baixas comprometem a temperabilidade adequada, enquanto quantidades muito altas estabilizam excessivamente a austenita, resultando na perda de dureza do material (TABRETT; SARE; GHOMASHCHI, 1996). A adição de silício aos FFBAcr tem como objetivo controlar a oxidação e melhorar a fluidez do material fundido durante o vazamento (BEDOLLA; RAINFORTH; MEJÍA, 2013).

Aprimorar a tenacidade dos FFBAcr tem sido objeto de pesquisa, envolvendo ajustes na composição química, modificação da matriz, morfologia, tamanho e distribuição de carbonetos. Esse aprimoramento inclui a incorporação de elementos formadores de carbonetos, como molibdênio, tungstênio, nióbio, titânio e vanádio. Durante o tratamento, esses elementos entram em solução sólida na austenita, formando gradualmente os carbonetos ao exceder o limite de solubilidade (TABRETT, SARE; GHOMASHCHI, 1996; YOUPING et al., 2012).

Em ligas mais recentes, a inclusão de um segundo elemento formador de carbonetos, como nióbio, tungstênio, vanádio, boro e titânio, tem sido adotada em conjunto com os carbonetos de cromo. Além disso, nióbio, vanádio e titânio são empregados como refinadores do tamanho de grão na matriz, como mencionado anteriormente (TABRETT, SARE; GHOMASHCHI, 1996; MENDEZ et al., 2014).

O Titânio é um elemento de liga utilizado para combater o desgaste abrasivo, sendo incorporado em revestimentos visando resistência à abrasão. Pesquisas conduzidas por Lima e Ferraresi (2009) demonstraram que revestimentos contendo carbonetos de titânio apresentaram taxas superiores de resistência à abrasão em comparação com ligas FeCrC e ligas com carbonetos de nióbio.

No grupo dos elementos de liga, o nióbio também se destaca, embora, conforme Woydt e Mohrbacher (2015), as propriedades tribológicas do carboneto formado por esse elemento sejam pouco exploradas. Entretanto, quando aplicado em aços, metais duros e ferro fundido, o nióbio demonstra propriedades notáveis.

Correa et al. (2015) destacam o nióbio como um elemento crucial em ligas FeCrC, aprimorando atributos nos quais o carboneto de cromo mostra limitações. Os autores explicam que carbonetos de nióbio, juntamente com vanádio, titânio e tungstênio, possuem uma morfologia adequada e dureza superior à dos carbonetos de cromo para resistência ao desgaste.

O nióbio, similarmente ao titânio, exibe uma morfologia esférica em seu carboneto, contribuindo para a resistência ao desgaste. Pereira et al. (2010) destacam essa microestrutura em uma liga composta de nióbio e ferro, concluindo que essa morfologia tende a oferecer resultados mais eficazes em ambientes sujeitos a processos de desgaste severos.

De acordo com Baik e Loper Jr. (1988) e Fiset, Peev e Radulovic (1993), o nióbio (Nb) desempenha um papel significativo na formação dos carbonetos M₇C₃ e NbC em ligas. A

presença de Nb influencia diretamente na quantidade desses carbonetos, sendo que o aumento da porcentagem de carbono leva a um aumento na quantidade de M₇C₃ para materiais com um determinado teor de Nb. Por outro lado, maiores teores de NbC e menores de M₇C₃ são formadas quando a quantidade de Nb é incrementada em ligas com um dado teor de C. Portanto, os carbonetos NbC têm uma preferência em relação aos M₇C₃, resultando no consumo preferencial de C pelo Nb na forma de NbC.

O carboneto de nióbio se forma antes dos carbonetos M₇C₃, levando a uma redução do carbono que está dissolvido no líquido. Isso resulta na diminuição do volume de M₇C₃ com o aumento do teor de nióbio, reduzindo a quantidade de cromo disponível para formar esses carbonetos eutéticos, aumentando a temperabilidade por conta do cromo que está presente na matriz austenítica. Além disso, os carbonetos de nióbio alteram a morfologia das regiões de austenita e M₇C₃, contribuindo para uma microestrutura mais refinada por meio de um núcleo heterogêneo e ancoramento dos grãos austeníticos nos carbonetos de nióbio formados (BEDOLLA-JACUINDE, 2016; KESRI; DURAND-CHARRE, 1987; ZHI et al., 2008; IBRAHIM; EL-HADAD; MOURAD; 2017).

Fiset, Peev e Radulovic (1993) observaram que nas ligas Fe-C-Cr-Nb, há uma menor quantidade de austenita retida em comparação com ligas sem nióbio. Isso se deve à baixa solubilização do nióbio nos carbonetos M₇C₃ e na austenita, resultando na maior parte do Nb presente na forma de NbC.

Os resultados de Ibrahim, El-Hadad e Mourad (2017) indicam que o aumento de nióbio resulta em uma dureza mais elevada, por conta do apoio da matriz com duros carbonetos de nióbio.

Um estudo realizado por Fiset, Peev e Radulovic (1993) revela que o incremento no teor de nióbio reduz o desgaste, sendo mais eficaz quando a liga passa pelo processo térmico com 2% de nióbio. Nesse contexto, a resistência à abrasão registra um aumento significativo de aproximadamente 22% devido à presença de NbC. Essa melhora é atribuída ao aumento da fração volumétrica de NbC, resultando em maior dureza e resistência ao desgaste, além da redução no volume dos carbonetos M₇C₃ e da alteração morfológica nas regiões eutéticas, melhorando a tenacidade à fratura.

Examinando um ferro fundido branco alto cromo hipereutético com a adição simultânea de titânio, nióbio, vanádio e molibdênio, Ma et al. (2013) estudaram a correlação entre microestrutura, dureza e tenacidade à fratura. Promovendo a alteração da microestrutura para eutética e, em seguida, hipoeutética, a adição de elementos de liga, incluindo apenas Nb, redefiniu a microestrutura e reduziu a quantidade de carbonetos de cromo primários. Contudo, esse benefício foi observado até uma quantidade específica de elementos adicionados (0,6% Ti / 0,6% Nb / 0,6% V / 0,35% Mo), após o qual teores mais altos desses elementos resultaram em diminuição das propriedades de dureza e tenacidade.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão expostos os materiais empregados e a metodologia adotada na condução deste estudo. A Figura 3.1 ilustra o fluxo de trabalho.

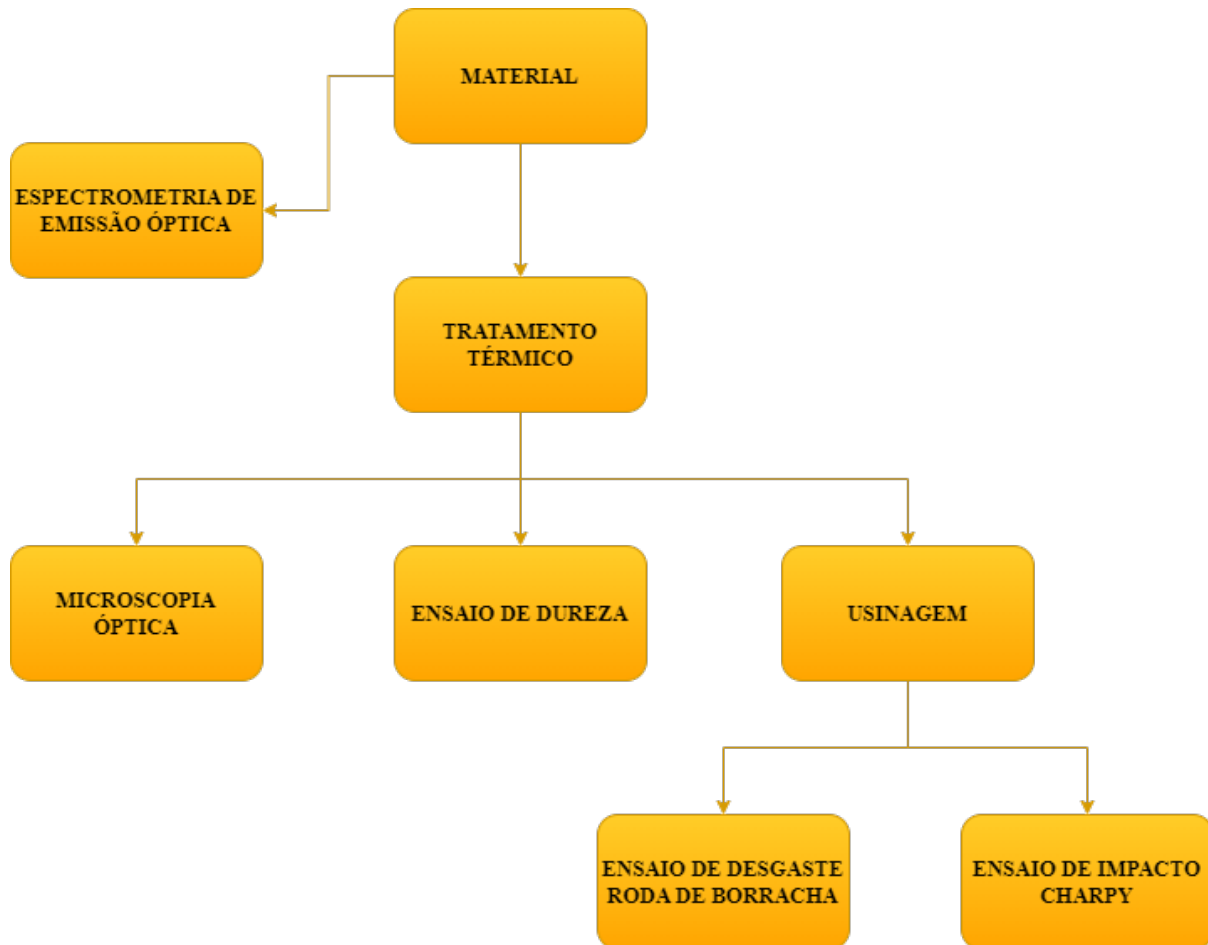


Figura 3.1 Fluxograma das etapas de pesquisa.

Fonte: Autor.

O processo de fundição foi conduzido pela empresa Ecoplan Aços Especiais Ltda., localizada no município de Cachoeirinha - RS, utilizando um forno à indução, marca Inductotherm e modelo com conversor Vip Power Trak série R, equipado com uma panela de vazamento de capacidade de 2000 kg. A carga do forno consistiu em sucata de aço de baixo carbono com adição de elementos de liga conforme exigido pelo escopo do projeto. O processamento ocorreu a uma temperatura de 1450°C, seguido pelo vazamento a 1420°C. Os moldes empregados foram confeccionados utilizando areia e resina fenólica.

A liga resultante foi vazada em corpos de prova com perfil circular e retangular, apresentando medidas específicas de Ø30x100mm e 80x30x16mm, respectivamente.

Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a um tratamento térmico de têmpera, com austenitização a 1050°C, durante 4 horas, seguido por resfriamento ao ar forçado utilizando ventilador. Em seguida, passaram pelo processo de revenimento (alívio de tensões) a 200°C, pelo período de 4 horas, e resfriamento ao ar livre em forno aberto. Todo o processo de tratamento térmico ocorreu na empresa Ecoplan Aços Especiais Ltda., utilizando forno a gás da marca CINEL, modelo N2 Cap 2500Kg.

3.1 Materiais e Métodos

3.1.1 Material

No desenvolvimento das ligas de FFBAcr para este projeto, adotou-se as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM A532 (2019), além de uma revisão abrangente da literatura pertinente. As composições escolhidas como parâmetro foram a Classe II tipo D e a Classe III tipo A, conforme tabela 2.1.

Avaliar comparativamente a resistência ao desgaste abrasivo em uma liga de Ferro Fundido Branco de Alto Cromo (FFBAcr) foi um dos objetivos centrais deste estudo, investigando a influência do acréscimo de cromo, nióbio e titânio em comparação com uma liga isenta ou com reduzido teor desses elementos de liga.

A base para a matéria-prima utilizada foi sucata de aço carbono de baixa liga, a qual foram adicionadas ferro ligas com elementos até os níveis estabelecidos pela norma ASTM A 532 (2019). Além disso, considerou-se a inclusão de nióbio e titânio, conforme mencionado anteriormente.

No decorrer do trabalho será empregado o termo 18Cr para designar uma liga contendo 18,0% de cromo, 25Cr-Ti para representar uma liga composta por 25% de cromo com adição de titânio, e 25Cr-Nb para denotar uma liga composta por 25% de cromo com adição de nióbio.

3.1.2 Análise Química

A análise química das ligas estudadas foi feita por espectrômetro de emissão óptica da marca Ametek, modelo MAXx LMF05, na empresa Ecoplan Aços Especiais Ltda.

3.1.3 Análise Metalográfica

As amostras para o ensaio metalográfico foram retiradas dos corpos de prova com perfil circular. As amostras foram lixadas seguindo a ordem de granulometria 180, 220, 400, 600 e 1200 mesh e polidas com pasta de alumina 0,03 micron. O ataque foi com o reagente Nital 4%, com tempo de ataque de 4 minutos, para obter a contraposição entre os carbonetos e a matriz. A microscopia óptica foi realizada nas instalações do Laboratório de Fundição (LAFUN), vinculado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, utilizando o equipamento microscópio óptico Olympus, modelo BX60M.

3.1.4 Ensaio de Dureza

Foram conduzidos ensaios de microdureza Vickers, seguindo as diretrizes da norma ASTM E92 (2017), e convertidas para HRc através da norma ASTM E140 (2012). A coleta de dados envolveu a realização de três medições em cada uma das três amostras produzidas para cada liga, totalizando cinco medições por superfície. Os ensaios foram executados utilizando o durômetro CQS - MI - 001 da marca Digimess, modelo TH-720, nas instalações da empresa CQS Laboratório de Ensaio e Calibração, localizada no município de São Leopoldo - RS.

3.1.5 Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto Charpy foi executado de acordo com os padrões estabelecidos pela norma ASTM E23-23a. Os corpos de prova utilizados possuíam uma seção transversal quadrada sem entalhe V, com dimensões de 10x10x55 mm. O ensaio foi realizado nas instalações da empresa CQS Laboratório de Ensaio e Calibração, utilizando o pêndulo de impacto Charpy, identificado pelo código 1323, marca Panantec ATMI e modelo PCD-300, equipado com um martelo de 300J.

3.1.6 Ensaio Roda de Borracha

A avaliação do desgaste abrasivo foi conduzida por meio de ensaios utilizando um abrasômetro com roda de borracha, visando analisar a resistência ao desgaste das ligas. Esses testes foram realizados nas instalações do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), vinculado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

Cada liga foi submetida a ensaios de desgaste em três amostras distintas, e a taxa de desgaste resultante foi calculada como a média dessas amostras. Após uma minuciosa limpeza com álcool etílico, as peças foram secas e posteriormente pesadas até atingir o equilíbrio na medição da massa por meio de uma balança analítica. Em seguida, foram submetidas ao ensaio de abrasão.

O procedimento seguiu as orientações rigorosas da norma ASTM G65 (2016), aplicando uma força compressiva de 130 N entre o corpo de prova e a roda de borracha, com permanência de 30 minutos. O fluxo de areia manteve-se entre 315 - 340 g/min, utilizando a Areia Normal Brasileira (ABNT NBR 7214: 2015) com a fração de abrasivo 100 mesh que foi retida no intervalo das peneiras de 0,3 mm a 0,15 mm, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

A partir das dimensões externas dos corpos de prova e da massa inicial das amostras, a densidade de cada material foi calculada com base na média dos três corpos de prova ensaiados. O cálculo da perda de massa envolveu uma nova lavagem utilizando álcool etílico, secagem por vento quente e pesagem até atingir equilíbrio no medidor. O Volume Perdido Ajustado (VPA) foi calculado mediante a equação (3.1):

$$VPA = \frac{\text{Volume perdido} \times \varnothing 228,6\text{mm}}{\text{Diâmetro da roda após uso}} \quad (3.1)$$

3.1.7 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers consistiu na realização de três impressões em cada amostra. O equipamento utilizado foi o microdurômetro óptico da marca Shimadzu, modelo M-92080. O ensaio foi conduzido nas instalações do Laboratório de Fundição (LAFUN), afiliado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Foi empregado um penetrador do tipo pirâmide de base quadrada, aplicando uma força de 200 gramas durante 10 segundos. A norma de referência adotada foi a ASTM E384 (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composições Químicas

A configuração das composições químicas resultante das ligas produzidas, que espelha a quantidade precisa de cromo, nióbio e titânio adicionados, está minuciosamente delineada na Tabela 4.1. A maior parte das composições químicas obtidas alinha-se com as expectativas, variando dentro das faixas de elementos das composições estabelecidas na norma ASTM A532. Entretanto, a liga 18Cr exibiu um teor de silício ligeiramente inferior, enquanto a liga 25Cr-Ti apresentou um teor de silício um pouco superior ao valor teoricamente especificado.

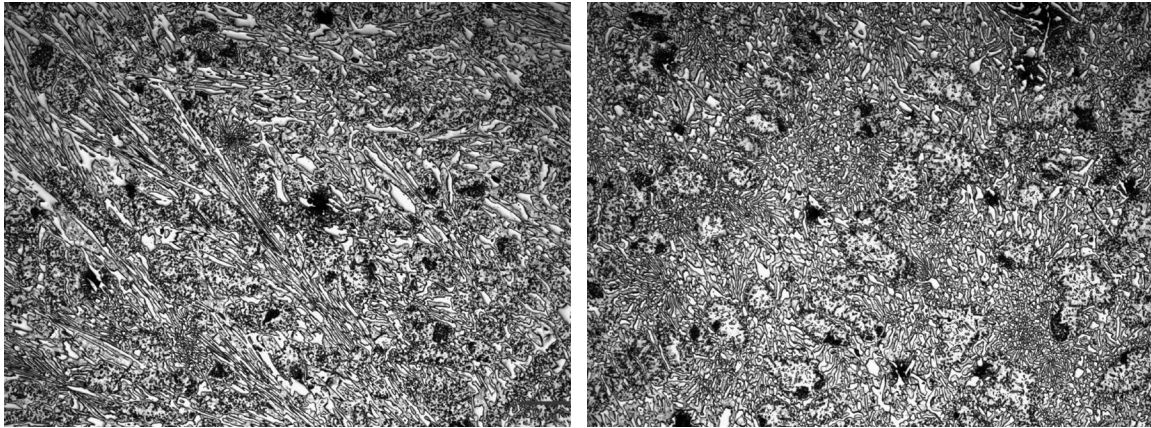
Tabela 4.1 Resultado da composição química dos FFBAcr produzidos (% em massa).

Classe	Tipo	Descrição	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
II	D	ASTM A532	2,0-	2,0	1,0-	2,5	18,0-	3,0	1,2	0,10	0,06
			3,3	máx	2,2	máx	23,0	máx	máx	máx	máx
III	A	ASTM A532	2,0-	2,0	1,5	2,5	23,0-	3,0	1,2	0,10	0,06
			3,3	máx	máx	máx	30,0	máx	máx	máx	máx
II	D	18Cr	2,88	0,996	0,945	0,957	18,46	0,286	0,252	0,038	0,018
III	A	25Cr-Ti (1,0%Ti)	2,92	0,537	1,55	0,293	25,16	0,281	0,018	0,037	0,022
III	A	25Cr-Nb (0,54%Nb)	3,10	0,718	1,34	0,194	24,91	0,081	0,018	0,032	0,022

Fonte: Autor.

4.2 Caracterização Microestrutural

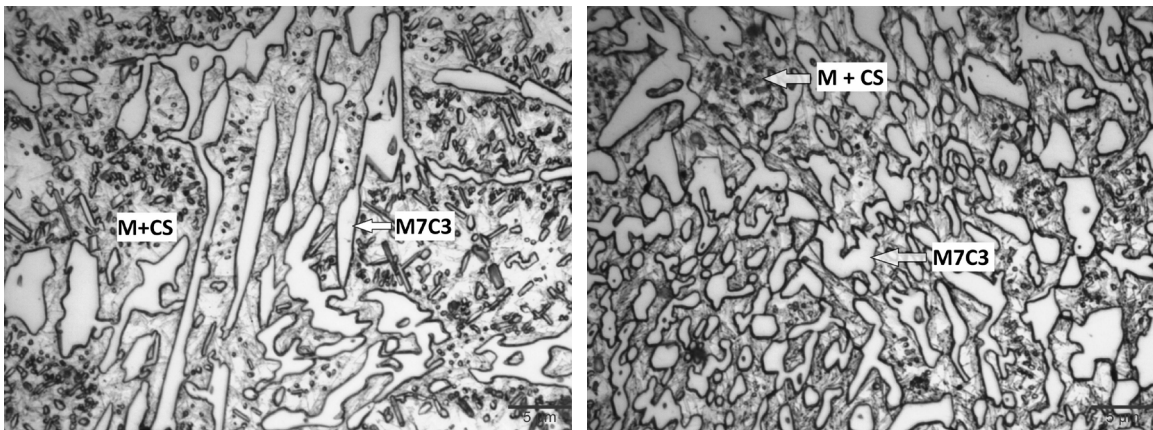
Na Figura 4.1 são apresentadas as imagens metalográficas da liga 18Cr, obtidas por microscopia óptica após ataque químico, em ampliações de 200X e 1000X. As imagens identificadas como (a) e (c) representam áreas nas proximidades da superfície, enquanto as imagens (b) e (d) correspondem a regiões mais centrais. Na figura 4.2 são apresentadas as microestruturas da liga 25Cr-Ti, e na figura 4.3 são apresentadas as microestruturas da liga 25Cr-Nb. Foram notadas alterações na morfologia dos carbonetos durante a solidificação das amostras. Nas áreas próximas à superfície, é visível a presença de carbonetos em forma laminar, ao passo que nas regiões mais centrais, predomina a forma radial. Uma outra característica observada foi o refinamento da microestrutura resultante da adição de titânio e nióbio.



(a)

(b)

200X

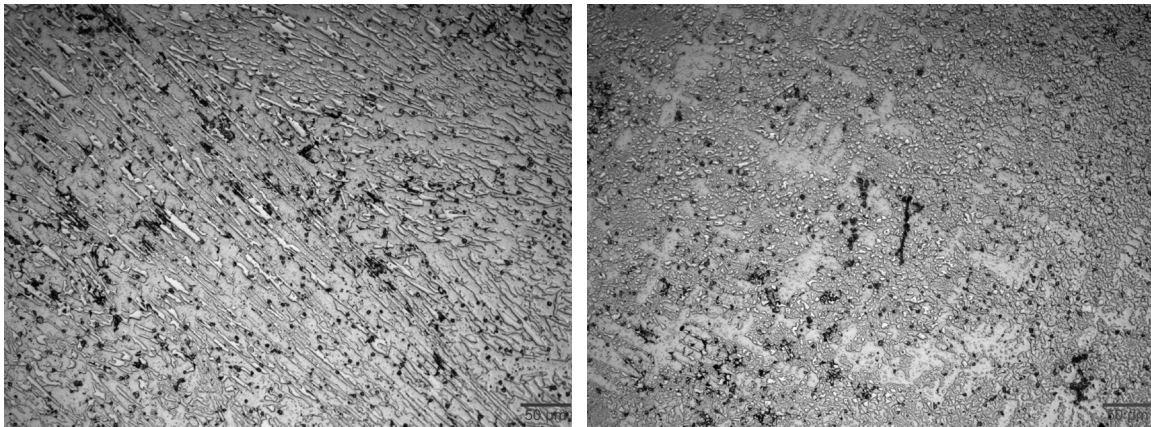


(c)

(d)

1000X

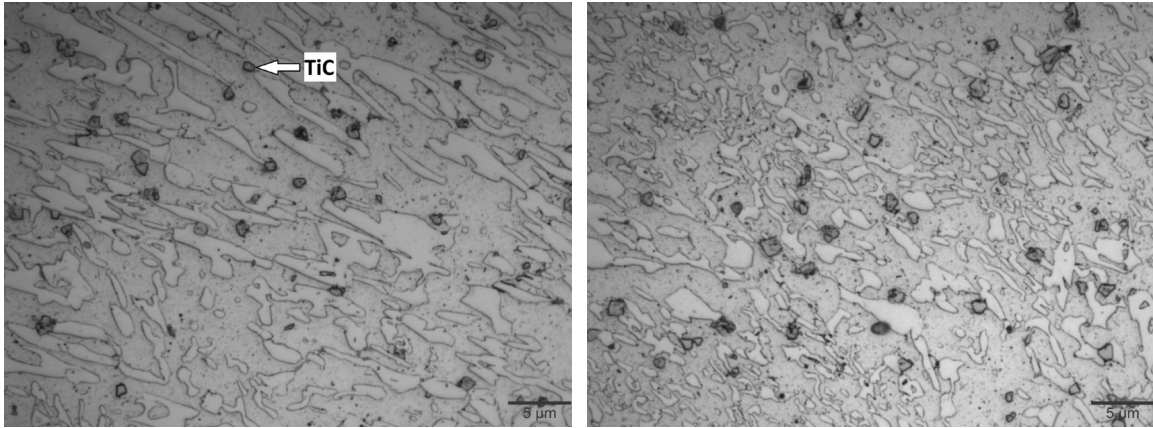
Figura 4.1 Microestruturas da liga 18Cr. Fonte: Autor.



(a)

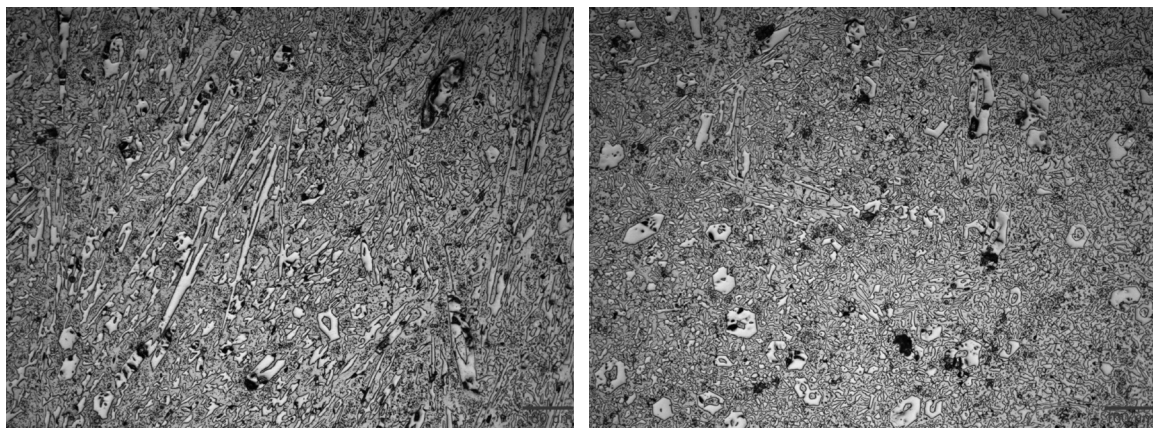
(b)

200X

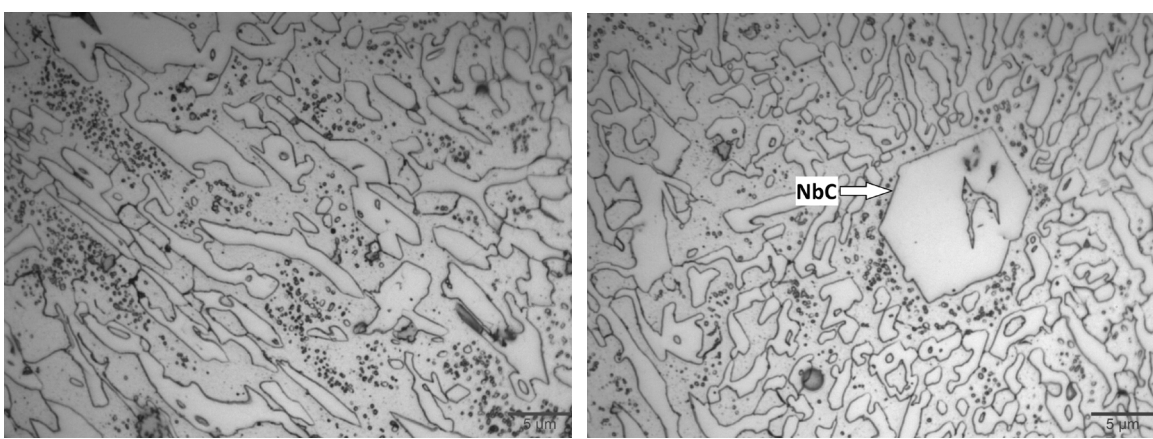


(c) (d)
1000X

Figura 4.2 Microestruturas da liga 25Cr-Ti. Fonte: Autor.



(a) (b)
200X



(c) (d)
1000X

Figura 4.3 Microestruturas da liga 25Cr-Nb. Fonte: Autor.

Conforme mencionado por Penagos (2017), a aplicação de Nital por 4 minutos proporciona um destaque contrastante entre a matriz (M) e os carbonetos M7C3. Estes últimos podem ser identificados em duas formas distintas: bastonetes radiais e laminar. Adicionalmente, os carbonetos de nióbio (NbC) também são visíveis, principalmente em sua configuração compacta na forma hexagonal, e também os carbonetos de titânio (TiC). A matriz predominante exibe características martensíticas com carbonetos secundários (CS) espalhados pela mesma, conforme observado por Pacheco (2018).

Os poros identificados provavelmente surgiram devido à remoção de inclusões durante o processo metalográfico ou durante a solidificação da liga.

De acordo com Tabrett, Sare e Ghomashchi (1996), modificações na composição que têm impacto limitado na microestrutura geralmente resultam em alterações pouco significativas na resistência ao desgaste. Portanto, é razoável inferir que as mudanças na microestrutura, pelo refino dos grãos, evidenciadas nas imagens, indicam variações na resistência ao desgaste, como elucidado na seção 4.3 deste mesmo capítulo.

4.3 Ensaio de Desgaste

Os resultados do ensaio de desgaste são apresentados na tabela 4.3 e a comparação do volume médio perdido ajustado está demonstrado na figura 4.4.

Tabela 4.3 Resultados obtidos no ensaio de desgaste Roda de Borracha.

Liga	Amostra	Massa Inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Volume perdido Ajustado (mm ³)	Média (mm ³)
18Cr	4	175,1328	174,8194	0,3134	44,5379	44,0465
	5	175,2411	174,9364	0,3047	43,2423	
	6	175,6138	175,3008	0,313	44,3592	
25Cr-Ti	10	175,9828	175,7317	0,2511	35,5441	34,8194
	11	176,0432	175,7981	0,2451	34,6620	
	12	176,1222	175,8804	0,2418	34,2521	
25Cr-Nb	16	180,0479	179,8191	0,2288	31,6562	30,3601
	17	180,0337	179,8297	0,204	28,2399	
	18	180,0296	179,8042	0,2254	31,1842	

Fonte: Autor.

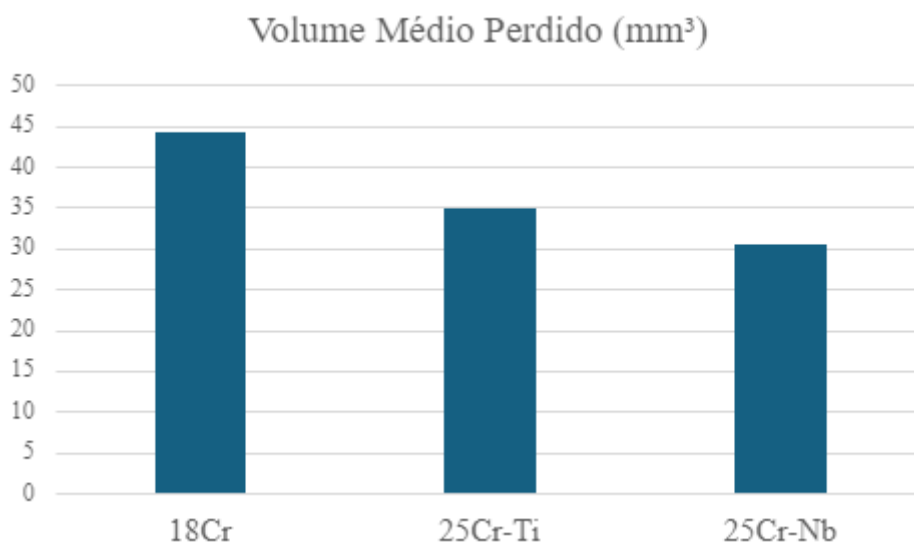


Figura 4.4 Resultado do volume médio perdido no ensaio de desgaste abrasivo.

Fonte: Autor.

Na análise realizada sob a conjuntura especificada de uma areia com 100 mesh, 130 N de força e 30 minutos de atuação, as amostras exibiram diferenças significativas, conforme destacado na tabela 4.3 e na figura 4.4. Este cenário indica que a incorporação de cromo, nióbio e titânio contribuiu para o aprimoramento da resistência ao desgaste do FFBAcr em estudo. As figuras 4.5 retratam o desgaste ocorrido na superfície dos corpos de prova utilizados após ensaio.

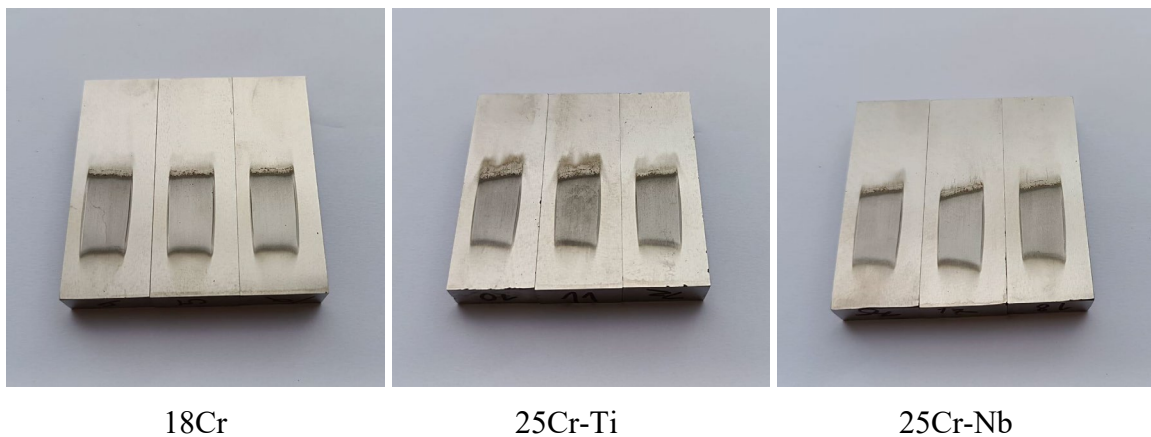


Figura 4.5 Desgaste na superfície dos corpos de prova. Fonte: Autor.

Destacou-se o desempenho superior da liga 25Cr-Nb, que demonstrou uma notável redução de 31% no desgaste em comparação com a liga 18Cr. Em seguida, a liga 25Cr-Ti apresentou uma diminuição de 21% na perda de volume devido ao desgaste, comparada a mesma liga 18Cr.

Os resultados dos testes de desgaste abrasivo das ligas examinadas refletem as interações entre os parâmetros microestruturais, que englobam a matriz, o tipo e a morfologia dos carbonetos, além da dureza, em concordância às constatações de Filipovic (2013).

A melhoria na resistência ao desgaste, conforme apontado por He-Xing et al. (1993), pode ser atribuída à inclusão de nióbio, resultando na formação de carbonetos extremamente duros. Pelo nióbio dissolver-se no carboneto M7C3, elevando sua dureza, pelo aumento da microdureza da matriz e pela forma que o carboneto de nióbio se encontra, esse efeito é alcançado.

4.4 Ensaio de Dureza Rockwell C

Na tabela 4.4 são apresentados os resultados de dureza obtidos após tratamento térmico.

Tabela 4.4 Resultados obtidos no ensaio de dureza.

Liga	Amostra	Dureza (HRC)	Média (HRC)
18Cr	1	65,0	65,0
	2	65,0	
	3	65,0	
25Cr-Ti	7	63,0	63,7
	8	63,0	
	9	65,0	
25Cr-Nb	13	65,0	64,7
	14	66,0	
	15	63,0	

Fonte: Autor.

O ensaio de dureza superficial Rockwell C revela resultados bastante próximos para as amostras 18Cr, 25Cr-Ti e 25Cr-Nb. Em uma análise preliminar, era de se esperar uma dureza maior para a liga com maior resistência ao desgaste, no entanto, os valores de dureza ficaram iguais considerando o desvio padrão.

A variação nos níveis de dureza, quando relacionada à resistência ao desgaste abrasivo, destaca uma condição enfatizada por Neale (2011) que é imprudente considerar a dureza isoladamente como o único critério para avaliar a resistência ao desgaste. Em vez disso, deve-se encará-la como parte de um conjunto mais amplo de características da liga. Esse conjunto engloba as propriedades da matriz, a microestrutura e a natureza específica do desgaste enfrentado pela liga ou revestimento.

4.5 Ensaio de Microdureza Vickers

Na tabela 4.5 são apresentados os resultados de microdureza obtidos após tratamento térmico. Por conta do tamanho e refino da microestrutura, não foi possível medir a dureza pontual dos carbonetos de titânio. A inclusão de titânio não resultou em alterações substanciais na microdureza da matriz, ao passo que a adição de nióbio proporcionou um aumento de 14% em sua dureza em comparação com as demais ligas. Os valores associados aos carbonetos M7C3 permaneceram próximos, considerando o desvio padrão, em todas as ligas. Notavelmente, os carbonetos de nióbio exibiram os valores mais elevados de microdureza, alcançando 1694 HV.

Tabela 4.5 Resultados obtidos no ensaio de microdureza.

Liga	Fase	Média (HV)
18Cr	M7C3	836
	Matriz	633
25Cr-Ti	M7C3	817
	Matriz	635
	NbC	1694
25Cr-Nb	M7C3	881
	Matriz	737

Fonte: Autor.

O acréscimo no teor de nióbio está associado ao aumento da microdureza na liga 25Cr-Nb. Essa relação decorre da diminuição na quantidade de carbonetos M7C3, resultante da presença mais significativa de carbonetos NbC. A redução no volume de carbonetos M7C3 implica em uma menor disponibilidade de cromo para a formação desses carbonetos. Consequentemente, a temperabilidade é incrementada devido a uma maior quantidade de cromo permanecendo na austenita, resultando em um aumento na microdureza (BEDOLLA-JACUINDE, 2016).

4.6 Ensaio de Impacto Charpy

Na tabela 4.6 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de impacto nas amostras após tratamento térmico.

Tabela 4.6 Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy.

Liga	Amostra	Energia Absorvida (J)	Média (J)
18Cr	1	4	4,3
	2	4,8	
	3	4	
25Cr-Ti	7	2	2,5
	8	2,8	
	9	2,8	
25Cr-Nb	13	3,7	3,3
	14	2,8	
	15	3,5	

Fonte: Autor.

O desempenho inferior ao impacto das ligas 25Cr-Ti e 25Cr-Nb, comparada a liga 18Cr, está correlacionado com a presença dos carbonetos de NbC e TiC, podendo influenciar negativamente na tenacidade, e no aumento da microdureza dos carbonetos produzidos.

Conforme mencionado por Ibrahim, El-Hadad e Mourad (2017), é comum que, para materiais do grupo dos metais, um incremento na dureza da matriz esteja vinculado a uma redução na tenacidade. No caso apresentado no item 4.4, não foi observado um aumento na dureza, porém no item 4.5 foi verificado um incremento na microdureza da matriz.

De acordo com as informações compartilhadas por Fiset, Peev e Radulovic (1993), a tenacidade não está exclusivamente relacionada à matriz, mas também depende significativamente da quantidade de carbonetos, bem como da forma em que se encontram e do tamanho desses carbonetos.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados, considerações e implicações desta pesquisa, que incluiu análises e ensaios visando comparar o desempenho e resistência ao desgaste abrasivo de diferentes ligas.

Foi identificada uma presença significativa de carbonetos de cromo, principalmente do tipo Cr₇C₃, nas matrizes martensíticas. A introdução de nióbio e titânio resultou na formação adicional de carbonetos específicos desses elementos, exibindo diversas morfologias, além de contribuir para o refinamento da microestrutura dos grãos.

Observou-se um aumento na microdureza da matriz em 14%, resultando em uma diminuição na tenacidade da liga contendo Nb. Os carbonetos NbC mostraram-se capazes de melhorar a resistência ao desgaste abrasivo da liga em 31%, sem afetar significativamente os valores de dureza. Por outro lado, a análise de microdureza evidenciou as disparidades entre os carbonetos e a matriz de cada liga. Os carbonetos TiC também contribuíram para um aumento na resistência ao desgaste abrasivo em 21%, sem exercer uma influência significativa nos valores de dureza, mas resultaram em uma redução na tenacidade.

Os melhores desempenhos, de maneira geral, foram observados na liga 25Cr-Nb, quando comparada às demais analisadas.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para futuras investigações, é sugerido realizar as seguintes análises:

- Avaliar o desempenho em campo entre martelos de desgaste e o teor de nióbio proposto neste estudo. Essa avaliação visa comparar os resultados obtidos em campo com aqueles alcançados em ambiente laboratorial;
- Modificar os parâmetros de tempo e temperatura no tratamento térmico, em especial com a liga 25Cr-Nb, e comparar os resultados com as conclusões deste trabalho. Essa variação nos parâmetros busca proporcionar uma compreensão mais abrangente do comportamento da liga em diferentes condições;
- Investigar diversos teores de nióbio, incluindo a concentração de 2,5% em massa na liga de estudo. Realizar os ensaios necessários para comparar os resultados obtidos, ampliando assim a compreensão dos efeitos do nióbio em diferentes proporções;
- Realizar um estudo mais aprofundado sobre a morfologia dos carbonetos, analisando a influência do teor dos elementos de liga. Utilizar técnicas como difração de raio-x para verificar os constituintes de cada fase e realizar uma análise quantitativa da microestrutura, proporcionando uma compreensão mais detalhada;
- Investigar a intervenção de mais elementos de liga, como o Boro ou Vanádio, na resistência abrasiva. Esta análise permitirá compreender melhor como diferentes elementos afetam as propriedades de resistência do material em estudo.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G132-96**: Standard Test Method for Pin Abrasion Testing. West Conshohocken, PA: ASTM International, 8 p., 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E140-12b**: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. West Conshohocken, PA: ASTM International, 25 p., 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM International G40-15**: Standard terminology relating to wear and erosion. West Conshohocken, PA: ASTM International, 9 p., 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23-16b**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 11 p., 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65-16**: standard test method for measuring abrasion using the dry sand / rubber wheel apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 14 p., 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E92-17**: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 10 p., 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A532-19**: standard specification for abrasion-resistant cast irons. West Conshohocken, PA: ASTM International, 4 p., 2019.
- ARCHARD, J. F. **Contact and rubbing of flat surfaces**. J. Appl. Phys. 24, p. 981–988, 1953.
- BAIK, H. K.; LOPER JR., C. R. **The influence of niobium on the solidification structure of Fe-C-Cr alloys**. AFS Transactions, v.96, n.88-80, p. 405-412, 1988.
- BARREIRO, J. A. **Fundiciones**. Madri, Editorial Dossat, 2 ed., 165p, 1963.
- BEDOLLA-JACUINDE, A. et al. **The effect of titanium on the wear behaviour of a 16%Cr white cast iron under pure sliding**. Wear, v. 263, n. 1–6, p. 808–820, 2007.
- BEDOLLA-JACUINDE, A.; RAINFORTH, M.W.; MEJÍA, I. **The role of silicon in the solidification of high-Cr cast irons**. Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 44, p. 856–872, 2013.
- BEDOLLA-JACUINDE, A. Niobium in cast irons. *In*: GLEBOVSKY, V. (Ed.). **Progress in metallic alloys**. 1st. ed. Croatia: InTech, cap.7, p. 187–219, 2016.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**, ABM, 4 ed., 504p, 1977.

CHUNG, R. J. et al. **Microstructure refinement of hypereutectic high Cr cast irons using hard carbide-forming elements for improved wear resistance**. *Wear*, v. 301, n. 1–2, p. 695–706, 2013.

CORONADO, J. J.; SINATORA, A. **Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates**. *Wear* 267, p. 2116–2121, 2009.

CORONADO, J. J. **Effect of (Fe,Cr)₇C₃ carbide orientation on abrasion wear resistance and fracture toughness**. *Wear* 270, p. 287–293, 2011.

CORREA, E. O.; ALCÂNTARA, N. G.; VALERIANO, L. C.; BARBEDO, N. D.; CHAVES, R. R. **The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process**. *Surf. Coatings Technol.*, vol. 276, p. 479–484, ago. 2015.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 50320**: Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste, v.53, p.619-622, 1997.

PACHECO, D. A. **Caracterização estrutural e propriedades mecânicas e tribológicas de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio**. Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, 2018.

EFREMENKO, V.; SHIMIZU, K.; CHABAK, Y. **Effect of Destabilizing Heat Treatment on Solid-State Phase Transformation in High-Chromium Cast Irons**. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 44A, n. 12/2013, p. 5434–5446, 2013.

EYRE, T. S. **Wear characteristics of metals**. *Tribology International*, v. 9, n. 5, p. 203–212, 1976.

FAGUNDES, J. G. J. **Reciclagem de cavacos para a formação de carbonetos de titânio no metal de solda produzido por soldagem gtaw em aço-carbono**. Campus de Ilha Solteira, 2015.

FILIPOVIC, M. et al. **Effect of niobium and vanadium additions on the as-cast microstructure and properties of hypoeutectic fe-cr-c alloy**. *ISIJ International*, v. 53, n. 12, p. 2160–2166, 2013.

FISSET, M.; PEEV, K.; RADULOVIC, M. **The influence of niobium on fracture toughness and abrasion resistance in high-chromium white cast irons**. *Journal of Materials Science Letters*, v. 12, p. 615–617, 1993.

GUITAR, M. A. *et al.* **High chromium cast irons: destabilized-subcritical secondary carbide precipitation and its effect on hardness and wear Properties**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 27, n. 8, p. 3877–3885, 2018.

HE-XING, C. et al. **Effect of niobium on wear resistance of 15%Cr white cast iron**. *Wear*, v. 166, n. 2, p. 197–201, 1993.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2nd. ed. Kidlington: Elsevier Science, 412 p., 2017.

IBRAHIM, M. M.; EL-HADAD, S.; MOURAD, M. **Enhancement of wear resistance and impact toughness of as cast hypoeutectic high chromium cast iron using niobium**. International Journal of Cast Metals Research, p. 1–8, 2017.

INTHIDECH, S.; MATSUBARA, Y. **Effect of alloying elements on variation of micro-hardness during heat treatment of hypoeutectic high chromium cast iron**. Materials Transactions, v. 49, n. 10, p. 2322–2330, 2008.

KARANTZALIS, A. E.; LEKATOU, A.; DIAVATI, E. **Effect of destabilization heat treatments on the microstructure of high-chromium cast iron: a microscopy examination approach**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 18, p. 1078–1085, 2009.

KESRI, R.; DURAND-CHARRE, M. **Phase equilibria, solidification and solidstate transformations of white cast irons containing niobium**. Journal of Materials Science, v. 22, n. 8, p. 2959–2964, 1987.

LAIRD, G.; GUNDLACH, R.; RÖHRIG, K. **Abrasion-resistant cast iron handbook**. Schaumburg, Illinois: American Foundry Society, 222 p., 2018.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. **Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira**. Soldag. e Insp., vol. 14, no 2, p. 140–150, 2009.

MA, Y. *et al.* **Microstructure and properties of Ti–Nb–V–Mo-alloyed high chromium cast iron**. Bulletin of Materials Science, v.36, n.5, p.839-844, Oct. 2013.

MARATRAY, F.; USSEGLIO-NANOT, R. **Factors affecting the structure of chromium and chromium--molybdenum white irons**. Climax Molybdenum S.A., 32 p., 1970.

MENDEZ, P. F. *et al.*, **Welding processes for wear resistant overlays**. J. Manuf. Process., vol. 16, no 1, p. 4–25, jan. 2014.

NEALE, M. J. **Lubrication and reliability handbook**. ButterworthHeinemann, 264 p. 2011.

NETO, O. S. **Avaliação da influência da adição de nióbio em um ferro fundido branco alto cromo hipoeutético na resistência ao desgaste**, Dissertação. PPGEM:UFRGS, Porto Alegre, 2021.

NOBLE, D. N. **Abrasive wear resistance of hardfacing weld deposits**. Metal Construction, v.17, n.9, p.605-611, 1985.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. 4ed. Bookman editora, p. 1269, 2013.

PEREIRA, B. *et al.* **CT-28 Revestimentos Duros Depositados por Soldagem: O Papel dos Carbonetos sobre a Resistência ao Desgaste Abrasivo (Hardfacing: The Role of Carbides on Abrasive Wear Resistant Coatings)**. XXXVI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2010.

- PENAGOS, J.J. et al., **Synergetic effect of niobium and molybdenum on abrasion resistance of high chromium cast irons**, *Wear* 376–377, p. 983–992, 2017.
- RABINOWICZ, E. **The least wear**, *Wear* 100, p. 533–541, 1984.
- RAYMOND, G. B. **Mechanical wear fundamentals and testing, revised and expanded**. 2nd. ed. Boca Raton, United States: CRC Press, 2004. 416 p., 2004.
- SAWAMOTO, A; ÔGI, K; MATSUDA, K. **Solidification structures of Fe-C-Cr-(V-Nb-W) alloys**. *AFS Transactions*, v.94,n.86-72, pA03-416, 1986.
- SINATORA, A.; ALBERTIN, E.; MATSUBARA, Y. **An investigation of the transition from M7C3 to M3C carbides in white cast irons**. *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 9, no 1, p. 9–15, 1996.
- STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Elsevier Butterworth-Heinemann, v.3, 2005.
- TABRETT, C. P.; SARE, I. R.; GHOMASHCHI, M. R. **Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys**. *International Materials Reviews*, v. 41, n. 2, p. 59–82, 1996.
- TABRETT, C. P.; SARE, I. R. **Effect of high temperature and sub-ambient treatments on the matrix structure and abrasion resistance of a high-chromium white iron**. *Scr. Mater.*, vol. 38, no 12, 1998.
- TANG, X. H. et al. **Microstructure of high (45wt.%) chromium cast irons and their resistances to wear and corrosion**. *Wear*, v. 271, n. 9–10, p. 1426–1431, 2011.
- THORPE, W. R.; CHICCO, B. **The Fe-rich corner of the metastable C-Cr-Fe liquidus surface**. *Metall. Trans. A*, vol. 16, no September, p. 1541–1549, 1985.
- WIENGMON, A. et al. **Microstructural and crystallographical study of carbides in 30wt.%Cr cast irons**. *Acta Materialia*, v. 53, n. 15, p. 4143–4154, 2005.
- WOYDT, M.; MOHRBACHER, H. **The use of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear resistant tribosystems**. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 49, no 1, p. 212–218, mar. 2015.
- YOUPIING, M. et al. **Effect of Ti-V-Nb-Mo addition on microstructure of high chromium cast iron**. *China Foundry* 9, p. 148–153, 2012.
- ZHANG, M. X.; KELLY, P. M.; GATES, J. D. **The effect of heat treatment on the toughness, hardness and microstructure of low carbon white cast irons**. *J. Mater. Sci.* 36, p. 3865–3875, 2001.
- ZHI, X. et al. **Effect of niobium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron**. *Materials Letters*, v. 62, n. 6–7, p. 857–860, 2008.

ZUM-GAHR, K. H.; DOANE, D. V. **Optimizing fracture toughness and abrasion resistance in white cast irons.** Metallurgical Transactions A, v.11A, p.613-620, 1980.